

# 中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051809

破風者-紊流與噪聲之流體力學探討

學校名稱：新北市立明德高級中學

作者：  高二 吳泓陞  高二 林皇佳  高二 黃龢	指導老師：  林步剛  蔡明哲
--	-----------------------------

關鍵詞：轉動力學、氣動聲學、流體力學

## 摘要

台灣綠能發展目前為能源界顯學，台灣為季風氣候，有得天獨厚的風場條件，然風機扇葉產生之低頻噪聲卻會對居民造成身心健康的影響。本研究嘗試研究扇葉噪聲之物裡蘊含，並以實作及模擬雙管齊下之方式，研究風機噪聲之行為特徵，實作實驗以自製之兩款風洞及四組扇葉，確實觀測到紊流，且與模擬圖形相似，並透過傅立葉轉換方法，得出噪聲強度最高處落於低頻。而模擬結果顯示，風機噪聲與紊流強度高度相關，且在攻角上升的情況下，會有愈大的紊流強度及噪聲，但商用型確有攻角上升，紊流與噪聲下降之情形。最後根據實驗結果比較改良，設計出自製创新型扇葉，其垂直最用力皆優於前列四款，且產出較低的噪聲強度，尤其在高攻角條件之下減噪效果更佳。

## 壹、研究動機

風力發電為我國能源政策之重要發展項目，但台灣沿岸風機的設置，除了造價高昂與產電量低以外，其風機運轉時會產生的低頻噪聲會對周遭居民產生心血管疾病或心理疾病的影響。根據學者 Rogers 等人之前的研究，風力發電機噪聲的來源主要可分為機械噪聲與氣動噪聲[4](Rogers et al, 2004)，而噪聲中的低頻噪聲會對人體產生較大傷害[1](馮玉明, 2014)。

以往科展研究均較重視於台灣沿岸風力發電機的發電量以及電功率等研究，較少強調在減少噪聲或紊流研究，因此，若是能從流體力學的層面去探討風力發電之葉形結構，將對於目前台灣風力發電永續經營有所幫助。

## 貳、研究目的

- 一、藉由自製風機風洞實體實驗，探討不同扇葉形狀及不同攻角之垂直作用力比較。
- 二、藉由設計截面風洞實體實驗，探討不同扇葉截面產生之紊流，分析流線軌跡。
- 三、探討不同形狀扇葉之實際噪聲，且進行傅立葉轉換 FFT 圖分析。
- 四、由自製小型風機測得知參數，對比模擬實驗之結果，分析其依存關係。
- 五、模擬台灣實體沿岸風機在不同扇葉形狀及不同攻角下的垂直作用力、紊流和噪聲。
- 六、分析現今沿岸風機扇葉在流體力學及噪聲之優缺點，改良並設計創造出新型扇葉。

## 參、研究設備及器材

表 1:研究器材表

聚光燈	消音綿	流場風洞	紊流風洞	風機基座	高速攝影機
藍牙麥克風	0.1MM 保麗龍球	實驗葉片(截面)		實驗葉片(整枝)	

## 肆、研究過程及方法

### 一、本實驗研究流程圖

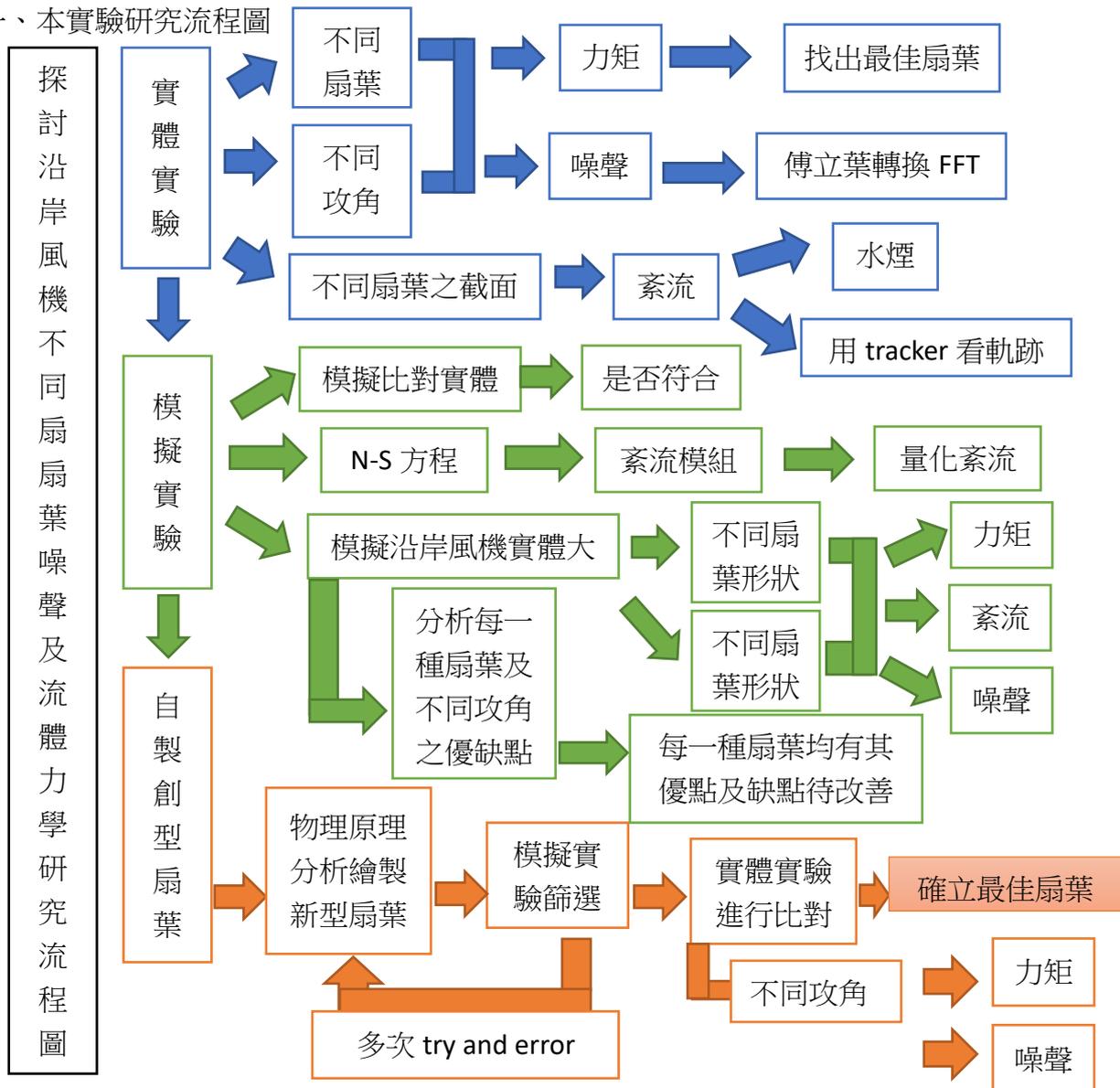


圖 1(a): 探討沿岸風機不同扇葉噪音及流體力學研究流程

## 二、文獻探討

根據過往學者 Rogers 等人之前沿研究，風力發電機噪聲的來源主要可分為機械噪聲與氣動噪聲 [4] (Rogers, 2004)，機械噪聲源於齒輪等等機械零件運轉產生，目前隨科技工業進步已大幅減少；氣動噪聲則是由於空氣通過風扇葉片所產生，Salt 等學者的研究指出，氣動噪聲中的低頻噪聲會對人耳產生較大的傷害與影響 [5] (Salt & Hullar, 2010)，因此本研究亦以探討氣動噪聲為主。

在 Afanasieva 等學者的研究中，水平風機的攻角對會對流場產生影響，當攻角越大時，所造成的紊流則會越大且分布越亂，進而使得噪聲提高[6](Afanasieva, 2017)，紊流模型可以以流體力學當中的統御方程式(Governing Equation)【N-S(Navier-Stokes equations)方程式】求解，其包含連續方程式及動量方程式。

## 三、相關理論方程式

流體的運動遵循質量守恆、動量定理、熱力學第一定律，對應連續方程(1)、動量方程式(2)跟能量方程(3)以及物性方程(4)，這幾項方程常稱為 N-S 方程組，如下所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad \sim(1)$$

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{V} + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad \sim(2)$$

$$\rho \frac{d\left(u + \frac{v^2}{2}\right)}{dt} = \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho qR \quad \sim(3)$$

$$P = \rho RT \quad \text{或} \quad P = \text{const} \quad \sim(4)$$

常見的流動分為兩種；層流 (Laminar flow) 如下圖(圖 1(b))所示  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$  為二維穩態流場，而紊流 (turbulence) 如下圖 1(c) (所示  $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$ ，流場較為混亂，未達穩態，且為三維方式流動。如果流動是紊流態時則進口處的流體微小流體團向下游動時軌跡是雜亂的，速度方向會隨時改變。本研究假定研究流體為不可壓縮流，流體由層流轉化為紊流是屬於穩定性理論中的條件穩定，即為只考慮黏滯性情況的臨界雷諾數，如本研究中開放流場情況下的臨界雷諾數約為  $1 \times 10^5$ ，紊流產生的概況圖如圖 1(d)及 1(e)。

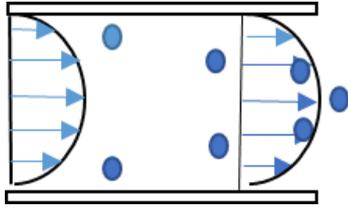


圖 1(b): 層流 (Laminar flow)

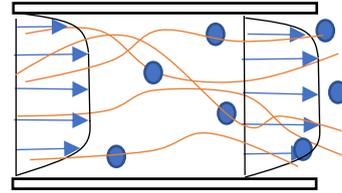


圖 1(c): 紊流 (turbulence)

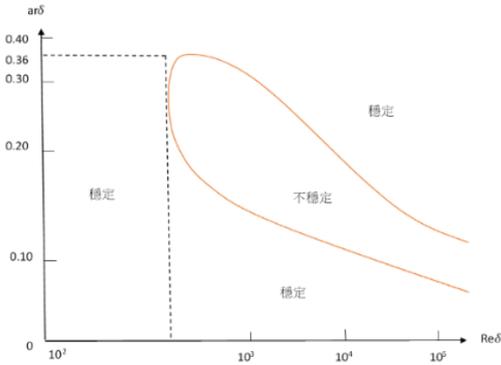


圖 1(d)紊流產生拇指圖

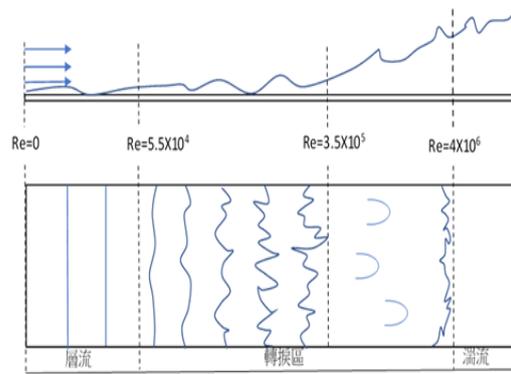


圖 1(e)紊流產生分析圖

#### 四、研究物理方程

(一). 連續方程式: 一般標準風場中風速約為 12 m/s，遠低於音速，因此風場的氣流可視為不可壓縮流，其連續方程式為:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

$\rho$  為流體的密度， $\mathbf{U}$  為流體的速度向量， $\partial$  為偏微分， $\nabla \cdot$  為散度算子

(二). 動量方程式: 在風場中的動量平衡只受壓力與黏滯力的影響，可用下列方程式描述:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot [(\mu^L + \mu^T) \nabla \mathbf{u}]$$

$\rho$  為流體的密度， $t$  為時間， $P$  為壓力， $\mu^L$  為流體的黏滯度， $\mu^T$  為紊流黏滯度

1. 當流體脫離物體後，會在其尾端產生渦流，其強度在流體力學中習慣以紊流動能  $m^2/s^2$  作為單位。
2. 紊流動能會在翼片後方產生渦流，依據其的動能強度會產生不同型態的渦流。

3. 大渦流產生小渦流的過程，將流場中的動能由大渦流傳遞給較小渦流，再傳遞給更小的渦流，直到透過流體的黏滯性，最小的渦流將動能消散(Dissipation)成熱能，此種能量的傳遞稱為能量階梯(Energy Cascade)，如圖 2。



圖 2 能量階梯

- (三). 雷諾數: 雷諾數較小時，黏滯力對流場的影響大，流場中流速擾動會因黏滯力而衰減，流體流動穩定為層流；在高雷諾數下流體受剪切力引響失去穩定性產生紊流。

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$\rho$  為流體密度， $\nu$  為流體速度， $D$  為特徵尺度， $\mu$  為流體黏製係數

- (四). 白努力方程: 在流體動力學，白努力原理指出，無黏性的流體的速度增加時，流體的壓力能或位能總和將減少。

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = constant$$

- (五). 紊流模型: 此方程為 ANSYS 計算紊流變化時所套用之方程，其方程式由 N-S 方程推導而來。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu^T}{\sigma} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} Gk - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

## 五、穩定風場的實驗裝置設計

- (一). 收縮段設計理論:

用漏斗狀前開口使原本在開口處不均勻流動的氣流收縮使兩條不同流速的流體受相同的壓力，因為進出口都是平行流動，所以這兩處的壓力是均勻的，因為經歷相同的壓降由伯努力方程可得出收縮過後風速的不均勻被減小。收縮段同時能使邊界層變薄已即使紊流度降低，在藉由穩定段的網格來消除流向漩渦，藉這些方法讓實驗更準確。

## (二). 低速風洞

風洞分為音速、亞音速和低速風洞，而本研究條為不可壓縮流，對應低速風洞之條件；馬赫數  $Ma < 0.3$  流速  $V = 1 \sim 60 \text{ m/s}$  故設計風洞時以低速風洞為樣本。

## (三). 風洞應用方式

1. 噪聲風洞實驗，為測定扇葉、攻角在不同風速下的影響，為求實驗精準，每次數據取得須盡可能在類似條件情況的穩定風場下進行，風洞設計規格如下圖 4(a) 穩定風場風洞設計圖。
2. 葉片紊流模擬與實際對照實驗；設計紊流風洞並以高速攝影拍攝每種葉片之流場變化與模擬圖是否有關，如下圖 5(a) 紊流風洞設計圖。

## 六、實驗風機及風洞製作方法詳述

(一). 風機基座製成: 為製成風機進行實驗，我們繪製了基座工程圖如圖 3(a)，不同的攻角 (Angle of attack) 判定概念圖如圖 3(b)。

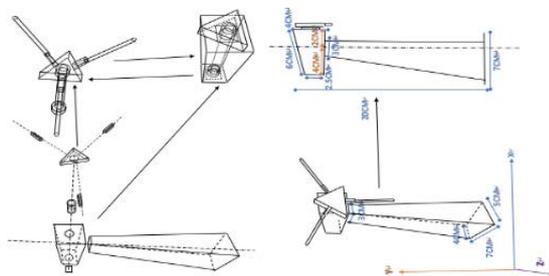


圖 3(a) 風機基座工程圖

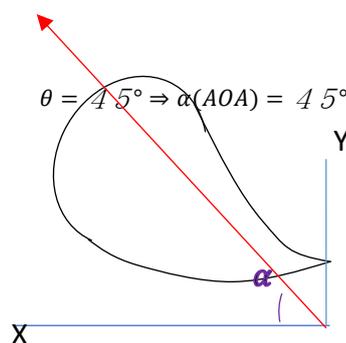


圖 3(b) 攻角 (Angle of attack) 圖

## (二). 穩定風場風洞

穩定風場風洞如圖 4(a)，風機由右側吹入，內部配置有配置有(1)進流壓縮段、(2)進流收斂段、(3)實驗區、(4)欄柵。因風扇緊貼進流壓縮段因此無必要設置進流穩定段，以此風洞

輔助自制風機之噪聲實驗，因此實驗段不在風洞內，風洞作為穩定流場之用，且內置網格狀欄柵後有更好效果，如圖 4(c)。

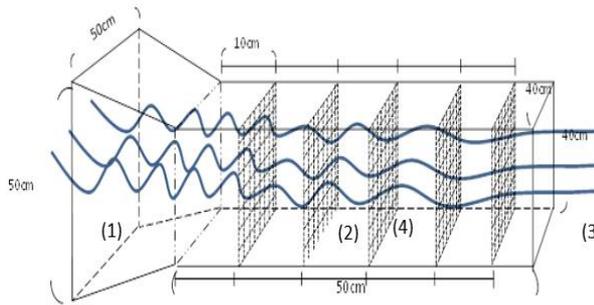


圖 4(a)穩定風場風洞設計圖



圖 4(b)穩定風場風洞

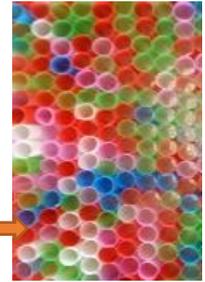


圖 4(c)內置網格狀欄柵

噪聲實驗:減少額外噪聲與量化分析，為了減少額外變因，使用消音棉吸收環境噪聲(電風扇馬達...等等)，並使用 Audio Director 軟體消除目標聲音以外的雜音，再以 Matlab 自己撰寫程式，跑出不同形狀扇葉及不同攻角噪音之傅立葉轉換 FFT 圖。

### (三). 紊流風洞

1. 由進流穩定段將流體集中，再藉由進流壓縮段讓流體藉由相同壓降達風場氣流平均差異下降，最後經由進流收斂段將流體轉化為層流。
2. 由於為讓葉片的氣動變化明顯因此操作周遭無有任何光源，因此在內部加裝 LED 使其流體明顯化，再將攝影器材至攝影區中實拍每種葉片之流場變化。紊流風洞如圖 5(a)及 5(b)，內部配置有(1)實驗段、(2)進流收斂段、(3)進流壓縮段、(4)進流穩定段、(5)LED、(6)柵欄、(7)實驗葉片、(8)攝影區。

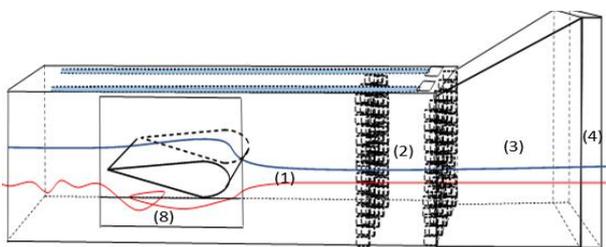


圖 5(a)紊流風洞設計圖



圖 5(b)紊流風洞

流場實驗:實驗流程圖如圖 6 所示，觀測紊流變化，將實驗用葉片之截面體放入攝影區，將葉片調整為攻角角度後隨經過葉片的氣流放入保麗龍球，搭配高速攝影機捕捉保麗龍球在不同葉片下方向流速之變化，最後導入 tracker 計算其速度以對比模擬實驗之數據。

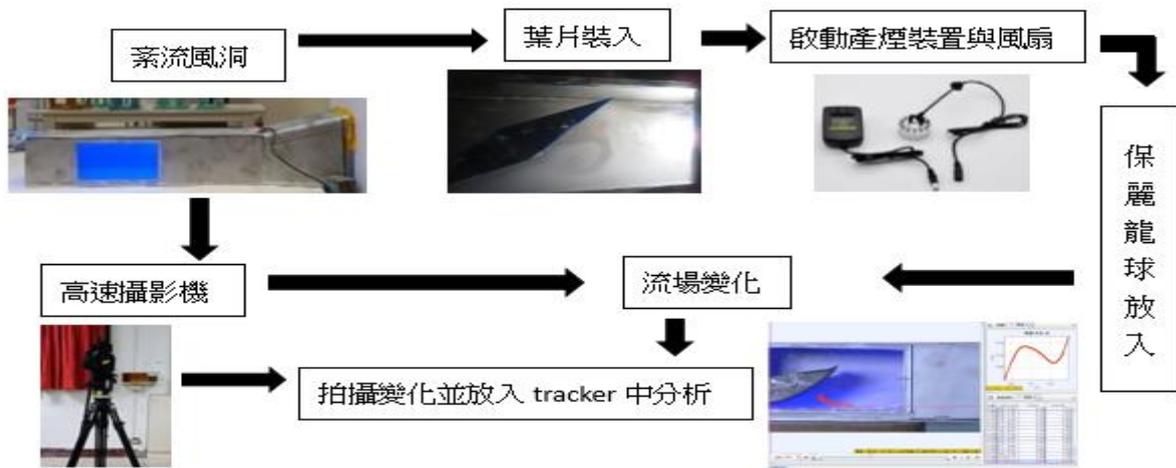


圖 6 紊流觀測實驗圖

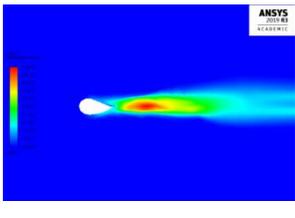
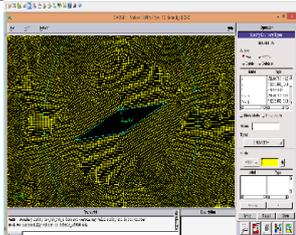
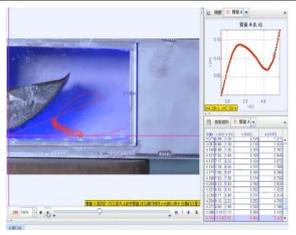
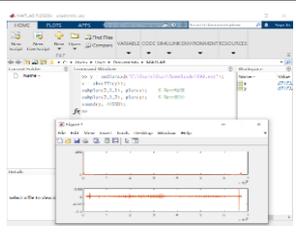
七、不同扇葉的參數變化:本研究自行繪製扇葉之工程三視圖，並以 3D 列印製作 NACA4415、菱形、兩個商用型，四種扇葉型貌(此四種葉片名稱為其截面之形狀)，進行實驗比較，逐項介紹如表 2:

表 2 實驗用扇葉三視圖及實體及設計理念說明

三視圖	實體	內容
		<b>【NACA4415 扇葉形狀】</b> :首位數字代表最大彎度占弦長的百分比。第二位數字代表最大彎度距機翼前緣的距離占弦長的十分之幾。
		<b>【菱形扇葉形狀】</b> :電風扇的扇葉角度設計的是將空氣往前吹，電風扇在轉動時，扇葉後方會產生低氣壓，而這低氣壓會使得空氣流向氣壓較高那一方
		<b>【商用型:水滴型扇葉形狀】</b> :主要是考慮整個槳葉在旋轉過程中能夠產生平穩的提升力。
		<b>【商用型-鋸齒型】</b> :使氣流自葉片高壓面流向低壓面，使葉片分離點向流動下方移動。降低葉片出口截面分離區，分離區渦流強度減少，噪聲也減少。

## 八、軟體的使用

- (一). ANSYS 計算流體力學分析軟體:因本研究無法實際製成等大之沿海風機扇葉，因此使用 ANSYS 模擬風機葉片在不同比列和形狀下的流場變化(如圖 6(a))。
- (二). Gambit：建模軟體，在導入 ANSYS 之計算前須先以 Gambit 中繪製葉片截面圖以及周遭流場網格，成為 ANSYS 能判讀之格式(如圖 6(b))。
- (三). Tracker：軌跡追蹤軟體，本研究使用 Tracker 追蹤紊流流線軌跡(如圖 6(c))。
- (四). Matlab：本研究用於噪聲的傅立葉 FFT 圖轉換(如圖 6(d))。

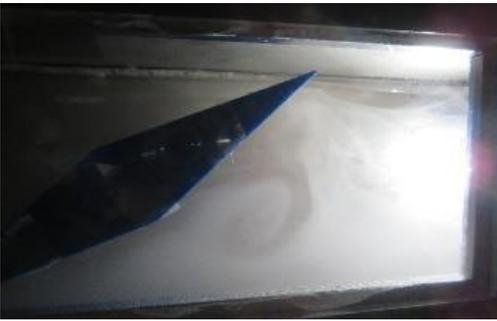
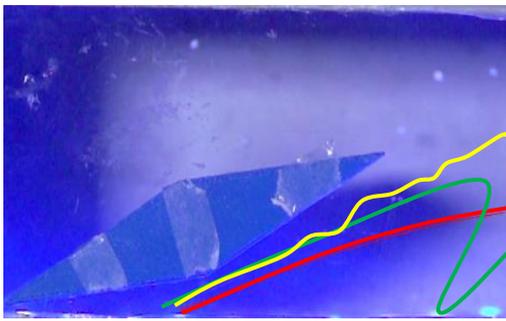
			
圖 6(a): ANSYS 程式	圖 6(b) :Gambit 程式	圖 6(c): Tracker 程式	圖 6(d) :Matlab 程式

## 伍、研究結果

一、藉由設計之實驗裝置，產出紊流，分析其軌跡及性質

(一). 菱形扇葉實測與觀察

表 3 菱形扇葉紊流及流線軌跡圖

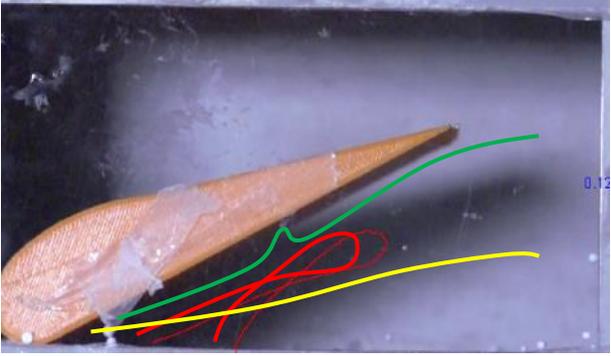
	
菱形扇葉紊流圖	菱形扇葉紊流軌跡圖 (紅)平均風速 4.1m/s (黃)平均風速 2.7m/s (綠)平均風速 2.0m/s
菱形紊流實驗記錄影片(請點選連結觀看) <a href="https://youtu.be/M2ICRKLIOUJ">https://youtu.be/M2ICRKLIOUJ</a>	菱形 tracker 實驗記錄影片(請點選連結觀看): <a href="https://reurl.cc/d0opy6">https://reurl.cc/d0opy6</a>

我們藉由製煙器所觀察出的紊流圖，從此圖中能清楚看到看到再扇葉中後方會形成一個順時針旋轉的渦流，而右邊三張圖示藉由 tracker 程式捕捉保麗龍球所得到的流線軌跡，我們藉此推算出該流線的單點風速及平均風速，而其中平均最快高達 4.1m/s，比原先的入口風

速 3.9m/s 還高，可以清楚發現下方加速流場對流速的影響，而綠色流線則是清楚呈現順時鐘的渦流，然而從下方的結果中能發現，其他扇葉的紊流皆以逆時鐘旋轉，此也為菱形扇葉最為特殊的地方。

(二).NACA4415 扇葉實測與觀察

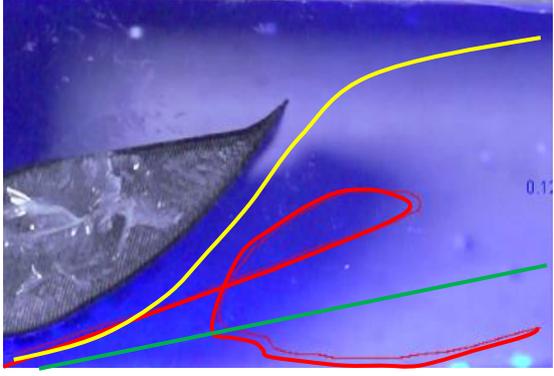
表 4 NACA4415 扇葉紊流及流線軌跡圖

	
<p>NACA4415 扇葉紊流圖</p>	<p>NACA 扇葉紊流軌跡圖 (紅)平均風速 1.15m/s(黃)平均風速 4.9m/s (綠)平均風速 3.0m/s</p>
<p>NACA4415 紊流實驗記錄影片： <a href="https://www.youtube.com/watch?v=iKzVtEe3_SE">https://www.youtube.com/watch?v=iKzVtEe3_SE</a></p>	<p>NACA4415 tracker 實驗記錄影片： <a href="https://reurl.cc/Mvo263">https://reurl.cc/Mvo263</a></p>

NACA4415 扇葉在煙中無法觀察到有方向較統一的渦流產生，但是可以看出後方流場確實較為混亂，而右邊三張流線軌跡圖相對於菱形較為清楚，渦流的平均風速只有 1.15m/s 為所有扇葉的所有軌跡中最小的，而三種軌跡中，黃色的軌跡所受紊流影響最小，且因下方的加速流的緣故，平均風速高達 4.9m/s，僅次於商用-水滴型。

(三). 菱形商用-水滴實測與觀察

表 5 商用水滴扇葉紊流及流線軌跡圖

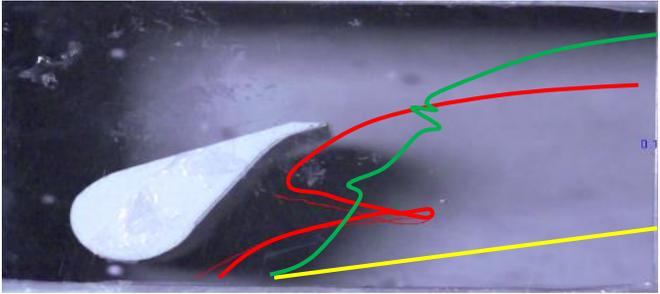
	
<p>水滴型扇葉紊流圖</p>	<p>菱形扇葉紊流軌跡圖 (紅)平均風速 2.1m/s (黃)平均風速 3.6m/s (綠)平均風速 4.9m/s</p>

商用水滴型紊流實驗記錄影片: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=73pnLv_djE">https://www.youtube.com/watch?v=73pnLv_djE</a>	商用水滴型 tracker 實驗記錄影片: <a href="https://reurl.cc/xZ8Wp4">https://reurl.cc/xZ8Wp4</a>
---	--

商用-水滴型扇葉是四種扇葉中，較容易觀察到紊流的葉型，在紊流圖、紅色線的部分中，可以看到兩者產生的渦紊流分布基本一致且十分清晰，且在四種扇葉的渦流中，有最高的平均風速 2.1m/s，而在黃、綠線中能發現，水滴型扇葉下方的加速流場為四種扇葉中最快的，因此兩者與其他扇葉在相同軌跡做風速比較時，遠快過其他的扇葉。

(四). 商用-鋸齒扇葉實測與觀察

表 6 商用鋸齒扇葉紊流及流線軌跡圖

	
鋸齒型扇葉紊流圖	菱形扇葉紊流軌跡圖 (紅)平均風速 2.1m/s (黃)平均風速 3.6m/s (綠)平均風速 4.9m/s
商用鋸齒型紊流實驗記錄影片: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=XGUPKT2oqWA">https://www.youtube.com/watch?v=XGUPKT2oqWA</a>	商用鋸齒型 tracker 實驗記錄影片: <a href="https://reurl.cc/yZaOD8">https://reurl.cc/yZaOD8</a>

商用-鋸齒型扇葉在結合紊流圖、紅線部分可以看出，此扇葉會產生兩個非常顯著的渦流，分別在扇葉尾翼後方及扇葉中後方的部分，鋸齒型較為特殊的地方為綠色的流線軌跡，可以看到流場後方受到特殊尾翼的影響所產生的順時針渦流，並且此渦流強道足以瞬間改變保麗龍球的方向使其往返向移動，直到脫離渦流後才跟著上方流場流出，因此商用鋸齒綠色的軌跡在與其他扇葉相同位置做比較時，風速也高過菱形扇葉及 NACA4415 扇葉，僅次於水滴扇葉。

二、自製小型風機，測量其噪聲並且作圖分析

(一). 測量扇葉之噪聲

1. 使用 Audio Director 消雜音

	
圖 7(a)實驗錄音原檔	圖 7(b)背景雜音消除後實驗體原聲檔

隔音箱環境中錄製聲音仍有些許雜音，且實體葉片噪音因為極為小聲所以我們使用 **Audio Director** 消除背景音頻以及放大實驗體音頻再放入 **Matlab** 轉換為 FFT 圖。

## 2. 測量扇葉之噪聲 FFT 圖

我們使用麥克風及藍牙傳輸將噪音傳送至一個隔音箱內，再使用分貝計錄製。投入軟體 **Audio Director** 消除雜音，再以 **Matlab** 進行傅立葉轉換，以求得扇葉之頻率強度，可見如圖 8，其中綠色部分是電扇之頻譜，橘色是消除背景音頻之頻譜。

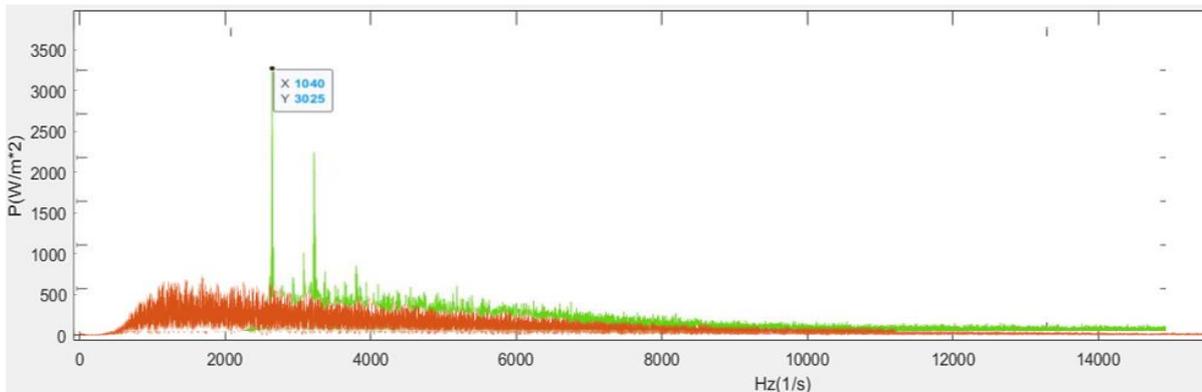
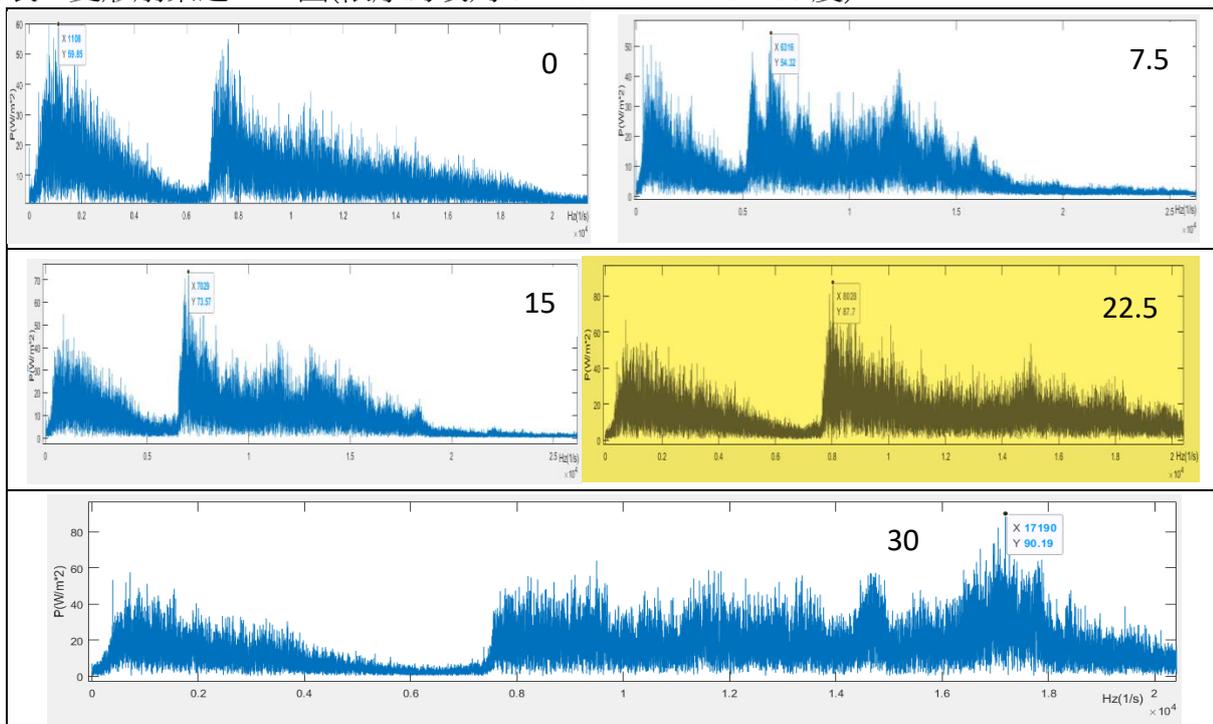


圖 8 疊合之傅立葉轉換圖

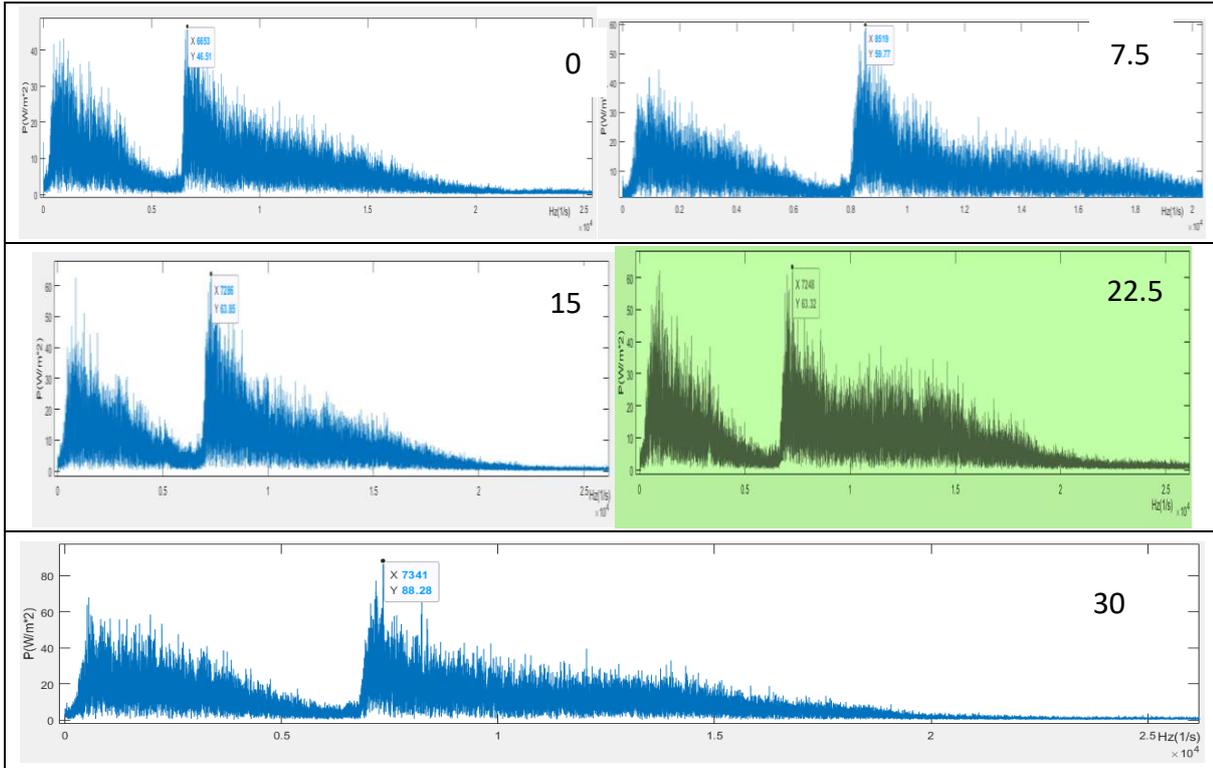
下表 7 至表 10 為各別扇葉去背景音頻之 FFT 圖，圖中 X 軸為頻率，單位赫茲(Hz)，Y 軸為積分強度，單位  $W/m^2$ 。色塊標記為其在低頻時的最大強度情形。

表 7 菱形扇葉之 FFT 圖(依序為攻角 0、7.5、15、22.5、30 度)



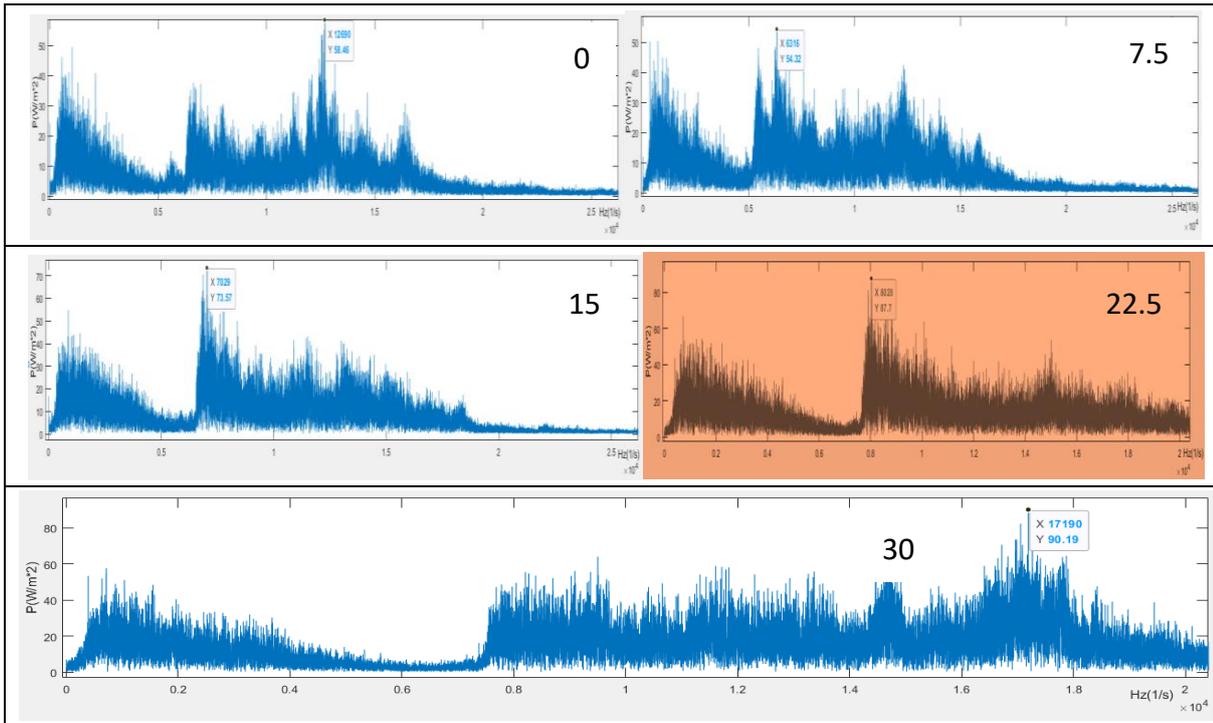
菱形扇葉最大強度音頻約在 7000~9000 左右，而在低頻時確實也有較高的強度，且 5000~6000 的強度較低。

表 8 NACA 扇葉之 FFT 圖(依序為攻角 0、7.5、15、22.5、30 度)



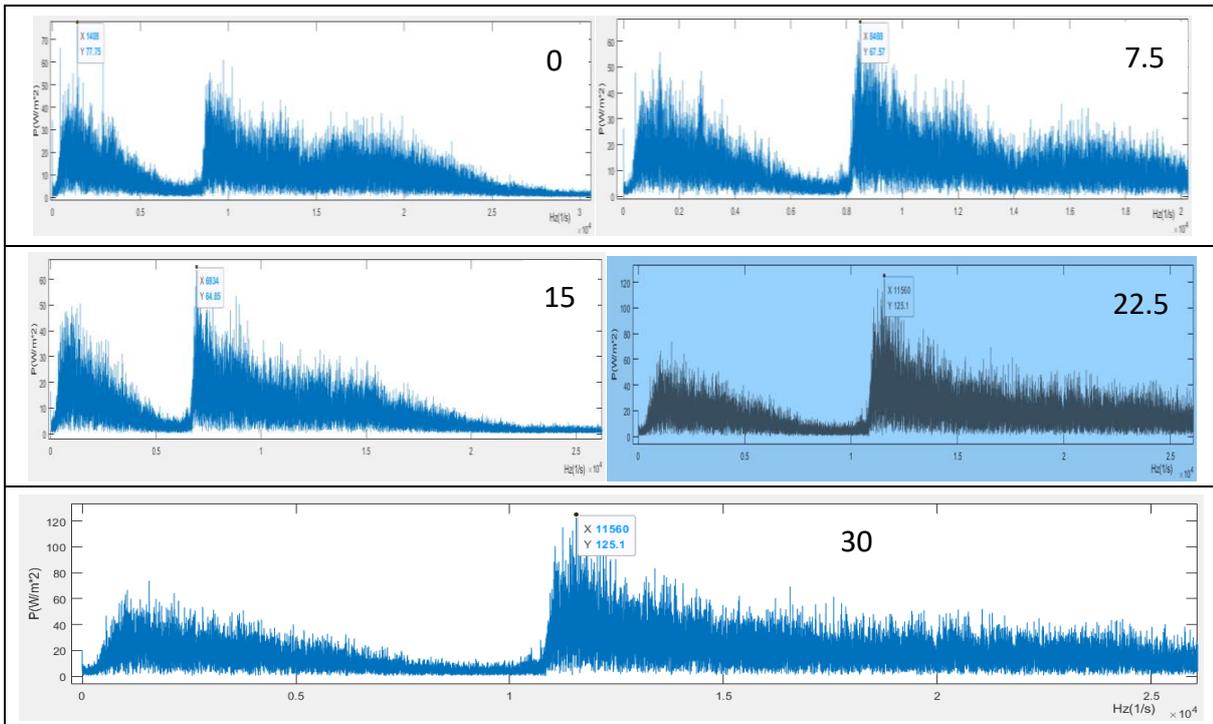
NACA 扇葉最大強度音頻約在 8000~11000，低頻時的強度沒有其他扇葉那麼強，且 6000~8000 的強度較低。

表 9 商用水滴扇葉之 FFT 圖(依序為攻角 0、7.5、15、22.5、30 度)



商用水滴扇葉最大強度音頻約在 500~1500 左右，確實為低頻噪聲，而在 8000~10000 時也有較高的強度，且 5000~7000 的強度較低。

表 10 商用鋸齒扇葉之 FFT 圖(依序為攻角 0、7.5、15、22.5、30 度)



商用鋸齒扇葉最大強度音頻約在 11000~13000 左右，而在低頻時也有較高的強度，且 8000~10000 的強度較低。

### 三、實驗與模擬之結合-比對小型風機之實作數據與模擬，佐證模擬之準確性

以 ANSYS FLUENT 程式對商用大型風機數值進行模擬前，我們先對自製小型風機的實測結果與 ANSYS 作比較標定，檢驗是否實測與模擬的誤差值在可容許範圍之內。先以 GAMBIT 程式，代入各式扇葉相關數據，繪製出網格，匯入 ANSYS 程式進行模擬分析。

#### (一). 噪聲檢定

我們使用風速 3.9m/s 進行實測，使用模擬程式進行分析，並針對其結果進行檢定，根據模擬的結果，所有扇葉中以菱形扇葉在攻角 30 度時所產生的噪聲  $8.75 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$  為最大，但噪聲都低於  $10^{12} \text{ W/m}^3$  以下，所以將其換算成分貝時，其分貝數均低於零分貝。(模擬噪聲因數據眾多記錄於研究紀錄本)。

#### (二). 紊流風場檢定

以紊流風洞實測四種扇葉截面之後方流線，發現確實都有渦流(紅色迴旋線段)產生，代表確實皆有紊流產生，與程式模擬結果相符。而由於我們是以高速攝影機將一秒鐘切成 480 張相片拍攝，紊流風速部分大約皆是模擬風速的 1/10，兩者速度比例吻合。

(模擬風速因數據眾多紀錄於研究紀錄本)。

### (三). FFT 檢定

將不同扇葉之在不同攻角情況下量得噪聲，再將之進行傅立葉轉換化為頻譜，可以見得高強度大多落在低頻區，與研究假設之低頻噪音情形吻合。

## 四、模擬實際風機在不同攻角下的垂直作用力、紊流和噪聲

### (一). 紊流模擬

有鑑於前人研究之攻角、紊流與氣動噪聲密切相關，我們代入實際風機之 size 數值，並使用風速 12、8.1、3.9、2.1(m/s)，以 ANSYS 程式模擬出攻角對於紊流及之表現情形，之所以取此四風速，風速 12 為模擬計算流體力學時常慣用的設定，風速 8.1 和 2.1 則是苗栗後龍沿海觀測站在 109 年一月分所測得的平均最大值與平均最小值，而風速 3.9 則是實測實驗所使用之風速，可以用於佐證模擬之準確性。程式輸出不同扇葉之最大紊流強度(單位  $m^2/s^3$ )如下圖所示:

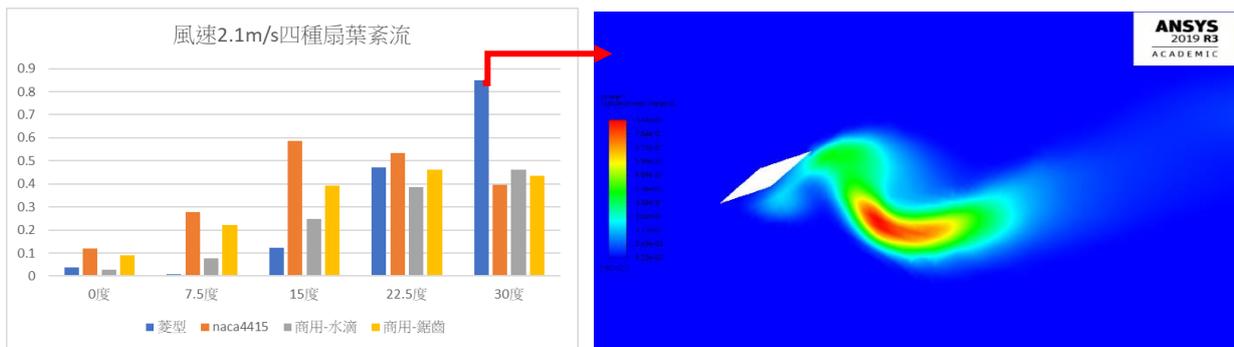


圖 8(a) 風速 2.1m/s 紊流圖

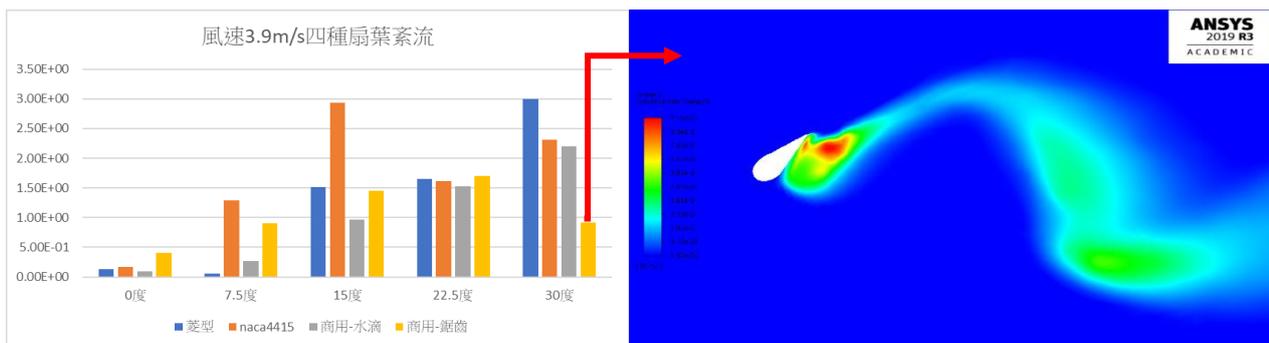


圖 8(b) 風速 3.9m/s 紊流圖

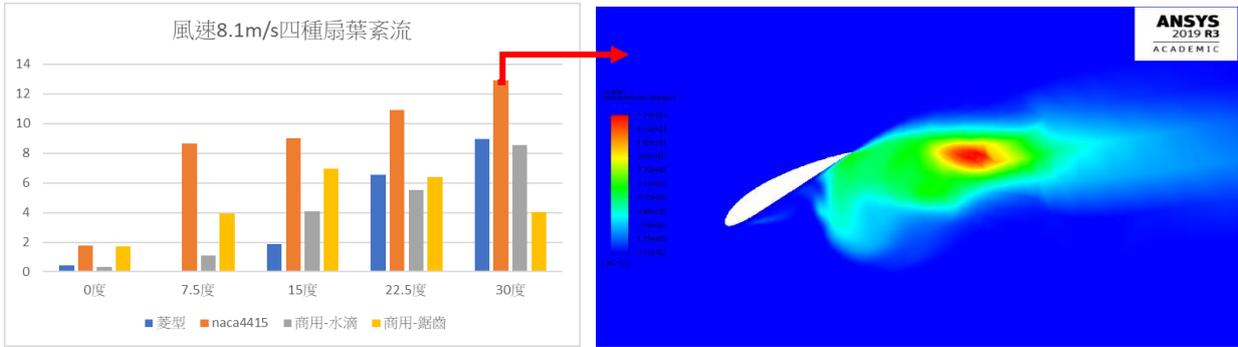


圖 8(c) 風速 8.1m/s 紊流圖

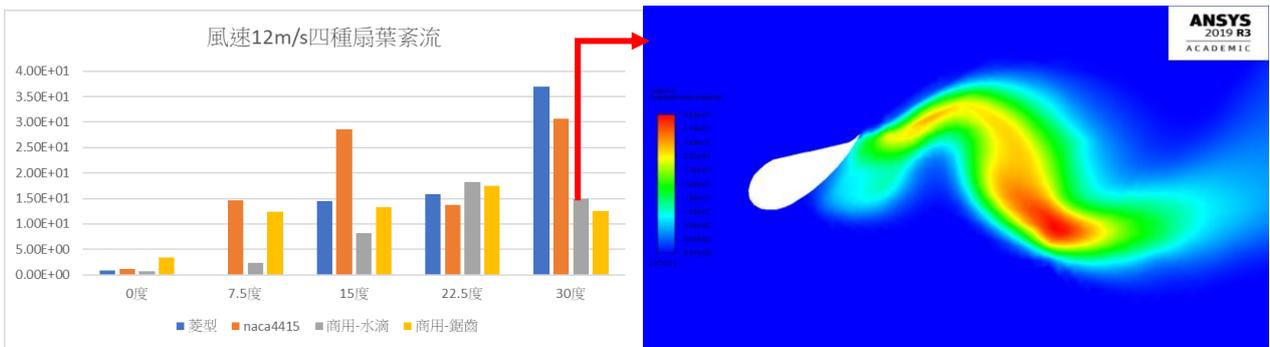


圖 8(d) 風速 12m/s 紊流圖

由輸出數據可知，隨攻角增加紊流強度也隨之上升，其中在攻角 0 度及 15 度時，以菱形扇葉所產生的紊流最小，NACA4415 扇葉的噪聲最大，當攻角提高到 15 度以上時，菱形扇葉及 NACA4415 扇葉所產生的噪聲會明顯高於兩款商用型，而商用型-鋸齒扇葉的紊流圖相當特別，其紊流強度在攻角 30 度時皆有下降趨勢，且在高風速、高攻角下有最低的紊流強度。

## (二). 噪聲強度

在四種風速下，攻角對於噪聲及之表現情形，程式輸出不同扇葉之積分最大噪聲強度如下圖所示(單位  $W/m^3$ ):

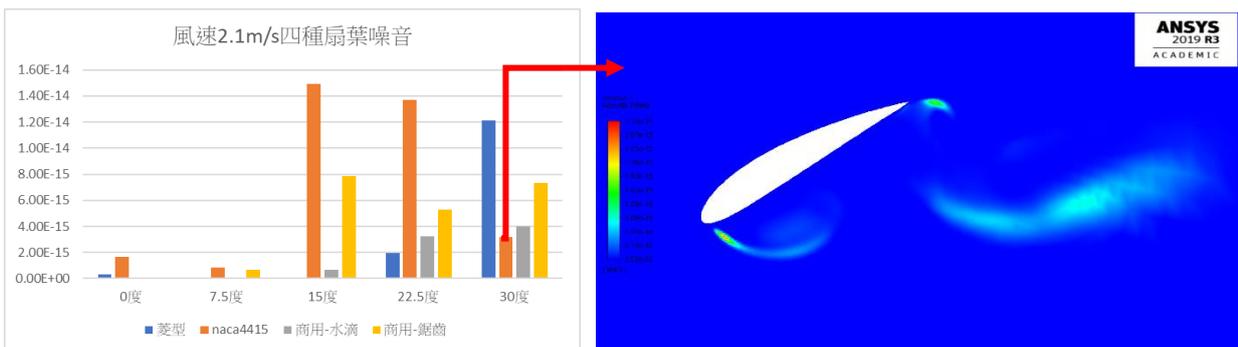


圖 9(a)風速 2.1m/s 噪聲圖

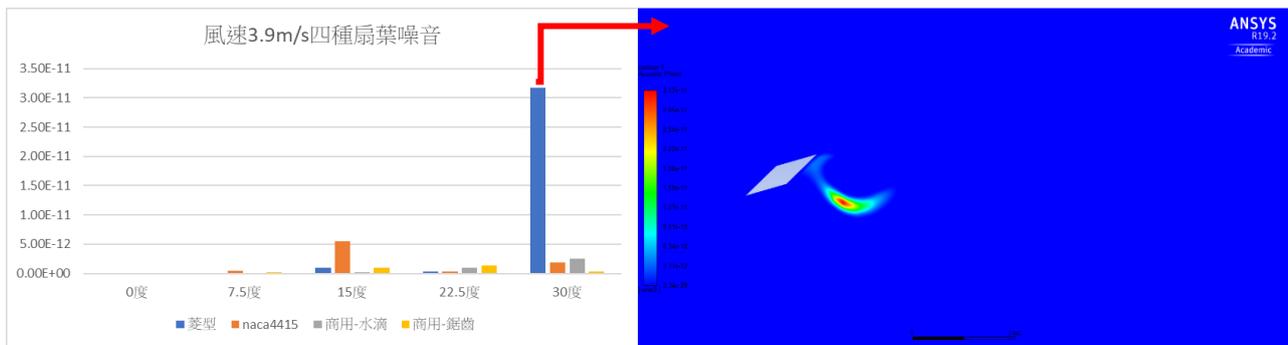


圖 9(b)風速 3.9m/s 噪聲圖

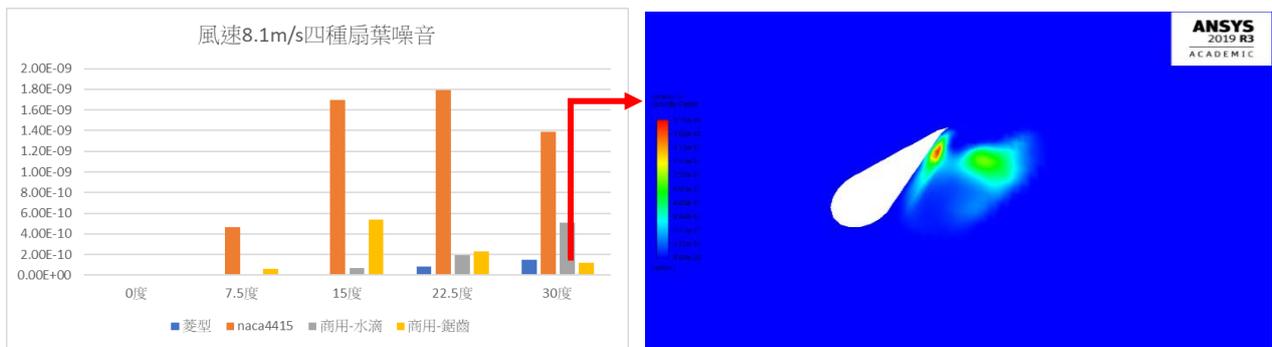


圖 9(c)風速 8.1m/s 噪聲圖

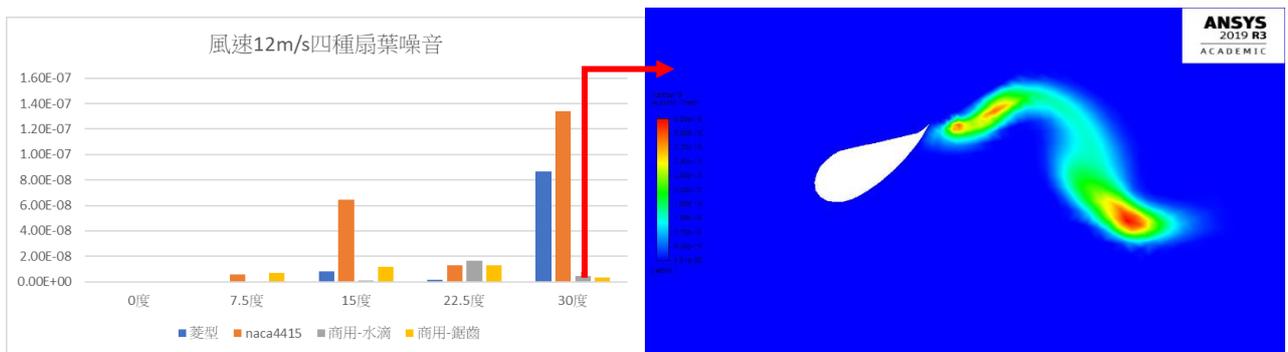


圖 9(d)風速 12m/s 噪聲圖

我們發現，在攻角 0 度時，大部分扇葉都還是維持著極小噪聲，而隨著攻角上升時，菱形扇葉及 NACA4415 扇葉會產生明顯大於兩款商用型扇葉的噪聲，並且在圖表中能發現商用型-鋸齒扇葉在高風速(12m/s、8.13m/s)下的噪聲相對於其他扇葉較小，但在低風速(3.9m/s、2.08m/s)時其產生的噪聲相對較大，顯示在高風速時商用型-鋸齒扇葉有較佳的降低噪聲能力。

### (三). 垂直作用力模擬

在四種風速下，攻角對於垂直作用力及之表現情形，程式輸出不同扇葉之垂直作用力(單位：N)如下表所示:

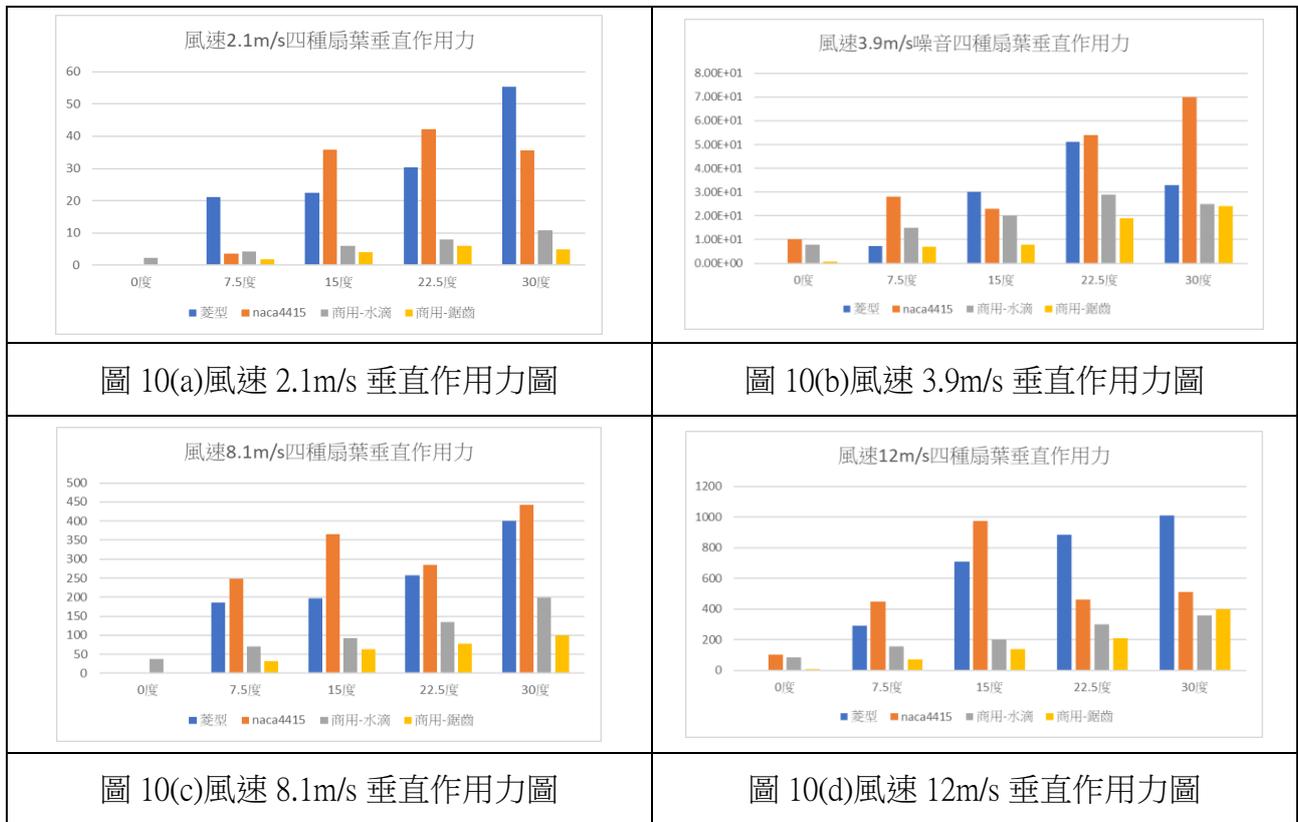


圖 10(a)風速 2.1m/s 垂直作用力圖

圖 10(b)風速 3.9m/s 垂直作用力圖

圖 10(c)風速 8.1m/s 垂直作用力圖

圖 10(d)風速 12m/s 垂直作用力圖

從文獻中得知風機的垂直作用力與發電量呈正相關，在模擬垂直作用力的方面可以看到，菱形及 NACA4415 扇葉的垂直作用力明顯優於兩款商用型，並且四種風速下接可以看到攻角上升時，垂直作用力隨之上升的趨勢，其中較為特殊的為風速 12m/s 下的 NACA4415 扇葉及風速 3.9m/s 下的菱形扇葉，其垂直作用力的表現與在其他風速時差異較大。

#### (四). 紊流強度與噪聲之相關性

從以上四分布圖表格可知，紊流強度分布圖與噪聲強度分布圖有很高的圖形相似程度，說明兩者有相當程度之相關性，因以我們使用 SPSS 程式對其進行分析，如下表

表 11 扇葉紊流與噪聲的迴歸分析-風速 8.13

攻角	0 度	7.5 度	15 度	22.5 度	30 度
R 平方值	0.885	0.940	0.627	0.814	0.779

由上表可知，在攻角 0 度條件下，R 平方值為 0.885，達到統計顯著正相關。而在攻角 7.5 度條件下，R 平方值為 0.940，達到非常統計顯著正相關。在 15 度條件下，R 平方值為 0.627，顯示為正相關但未達統計顯著。在攻角 22.5 度條件下，R 平方值為 0.814，達到統計顯著正相關。最後在 30 度條件下，R 平方值為 0.779，也達到統計顯著正相關。

表 12 扇葉紊流與噪聲的迴歸分析-風速 12

攻角	0 度	7.5 度	15 度	22.5 度	30 度
R 平方值	0.872	0.939	0.840	0.345	0.919

由上表可知，在攻角 0 度條件下，R 平方值為 0.872，達到統計顯著正相關。而在攻角 7.5 度條件下，R 平方值為 0.939，達到非常統計顯著正相關。在 15 度條件下，R 平方值為 0.840，達到統計顯著正相關。在攻角 22.5 度條件下，R 平方值為 0.345，顯示為正相關但未達統計顯著。最後在 30 度條件下，R 平方值為 0.919，同樣達到統計顯著正相關。

#### (五). 綜合討論

##### 1. 風速對紊流及噪聲所產生之影響

從紊流分布圖及噪聲分布圖上來看，四種扇葉的紊流強度及噪聲強度在高強度區域(紅色區塊)大致上所占比例皆增加，說明隨風速提升，紊流強度及噪聲強度在高強度區域皆上升。而隨攻角增加(左至右)，四種扇葉，紅色區域所占比例皆上升，說明攻角上升，提升紊流強度，連帶噪聲強度也增加。

##### 2. 垂直作用力與噪聲之關聯

菱形及 NACA4415 扇葉的垂直作用力圖與噪聲圖相當相似，然而兩款商用型的垂直作用力與噪聲並無直接的關聯性，顯示出藉由特殊的扇葉設計可以幫助風機在攻角提升、垂直作用力提升時，降低其噪聲產生。

##### 3. 綜合紊流、噪聲及垂直作用力的結果，

我們發現商用型扇葉在設計時，兼顧了穩定性、及降低噪聲的效果，但是在發電量的部分還有待改進，而鋸齒型扇葉較適合於高風速的環境，在此情況下該種扇葉優於商用型-水滴扇葉，能達到低噪聲的同時擁有較高發電量的效果，然而處在低風速得情況下，會產生低發電量、高噪聲污染等缺點，而商用水滴扇葉較前者更為穩定，雖然數值部分並無突出亮點，但卻在各風速、攻角下皆有不錯的表現。

#### 五、根據實作及模擬成果，設計出最佳化的扇葉模組與聲場情形

(一). 根據實驗三之研究結果，我們發現可以藉由設計特殊形狀之葉片，達到在有較高垂直作用力的同時，仍保持低噪聲的效果，因此我們結合在高風速、高攻角下仍有較佳減噪效果的商用型-鋸齒型扇葉及在各種風速、攻角下皆有高垂直作用力的 NACA4415 扇葉，以及在低攻角時有極低噪聲的菱形，找出一款能兼具高發電量及低噪聲的風機扇葉。

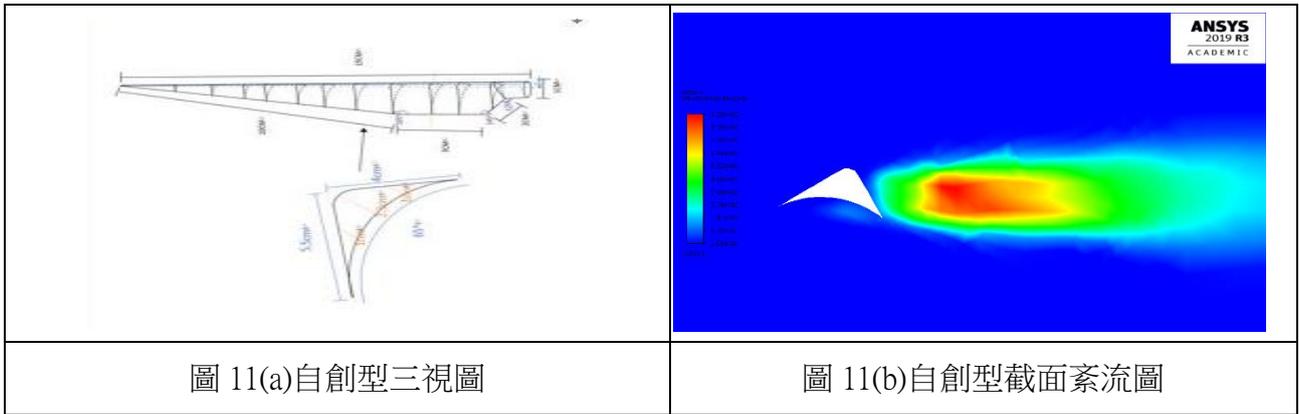


圖 11(a)自創型三視圖

圖 11(b)自創型截面紊流圖

(二). 實測自創扇葉與其他扇葉之比較

1. 實測垂直作用力比較和轉速比較(樣本數 N=30)

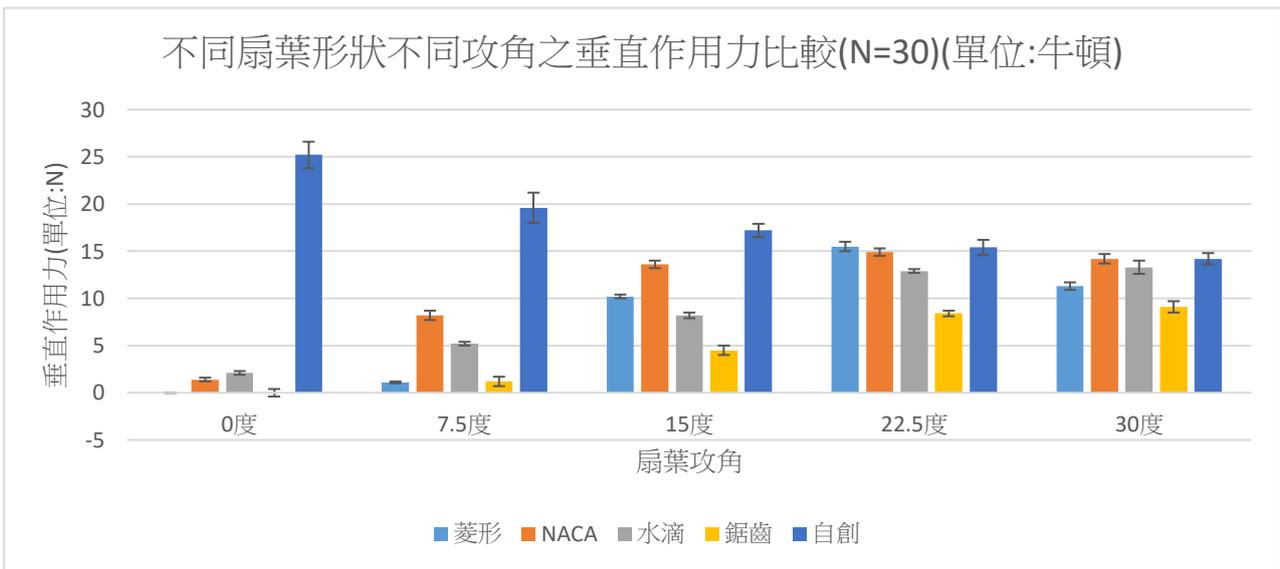


圖 12(a)實測垂直作用力比較

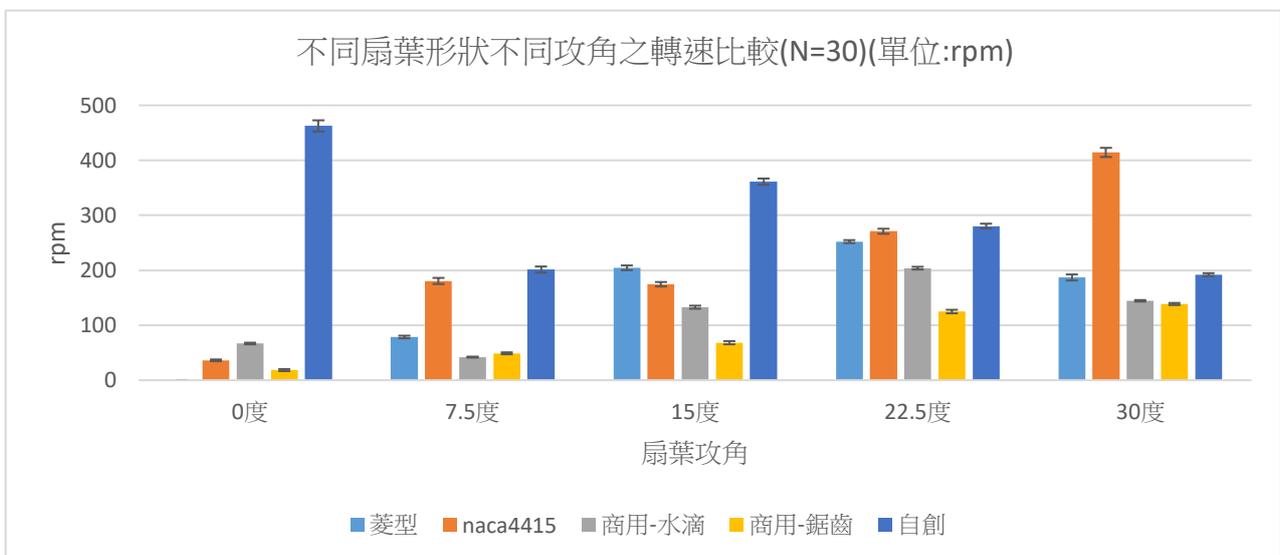
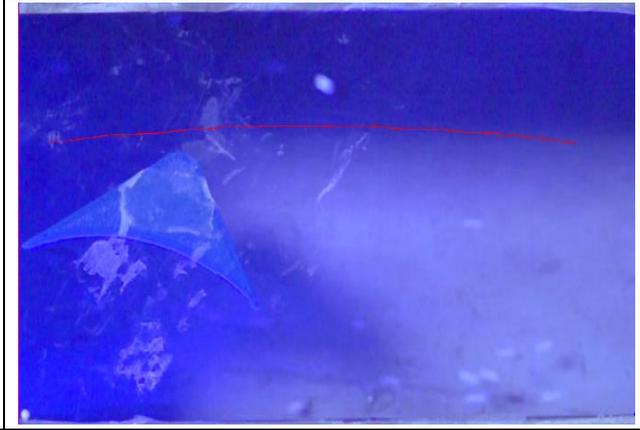


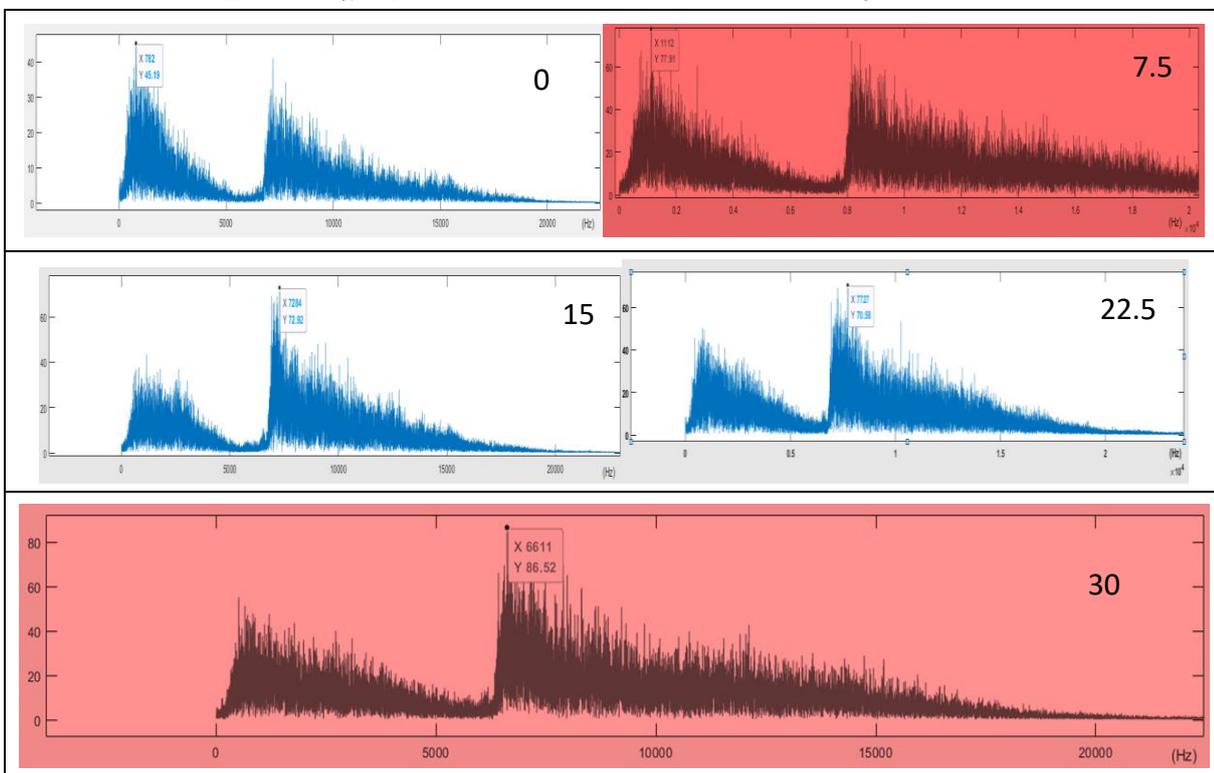
圖 12(b)實測垂直作用力比較

## 2. 實測紊流之比較

	
<p>自創型紊流圖</p>	<p>自創行紊流軌跡圖</p>
<p>自創型紊流實驗記錄影片：  <a href="https://reurl.cc/1xW8KQ">https://reurl.cc/1xW8KQ</a></p>	<p>自創型紊流軌跡實驗紀錄影片  <a href="https://reurl.cc/d0op16">https://reurl.cc/d0op16</a></p>

## 3. 實測噪聲之比較

表 13 自創扇葉之 FFT 圖(依序為攻角 0、7.5、15、22.5、30 度)



自創型扇葉與前四款扇葉相當音頻表現情形相當不同，的其最大強度約在音頻 6000~10000 和 500~1500，低頻時確實有較高的強度，然最高強度是坐落在低攻角 7.5 度而非其他四種扇葉的 22.5 度，且最大強度在  $60\text{W}/\text{m}^2$  以下，並且在高攻角 30 度時，最高強度反而下降到  $50\text{W}/\text{m}^2$ ，噪聲變得更小。

(三). 模擬自創扇葉與其他扇葉之比較:下表為垂直作用力及噪聲比較

表 13(a)模擬垂直作用力比較

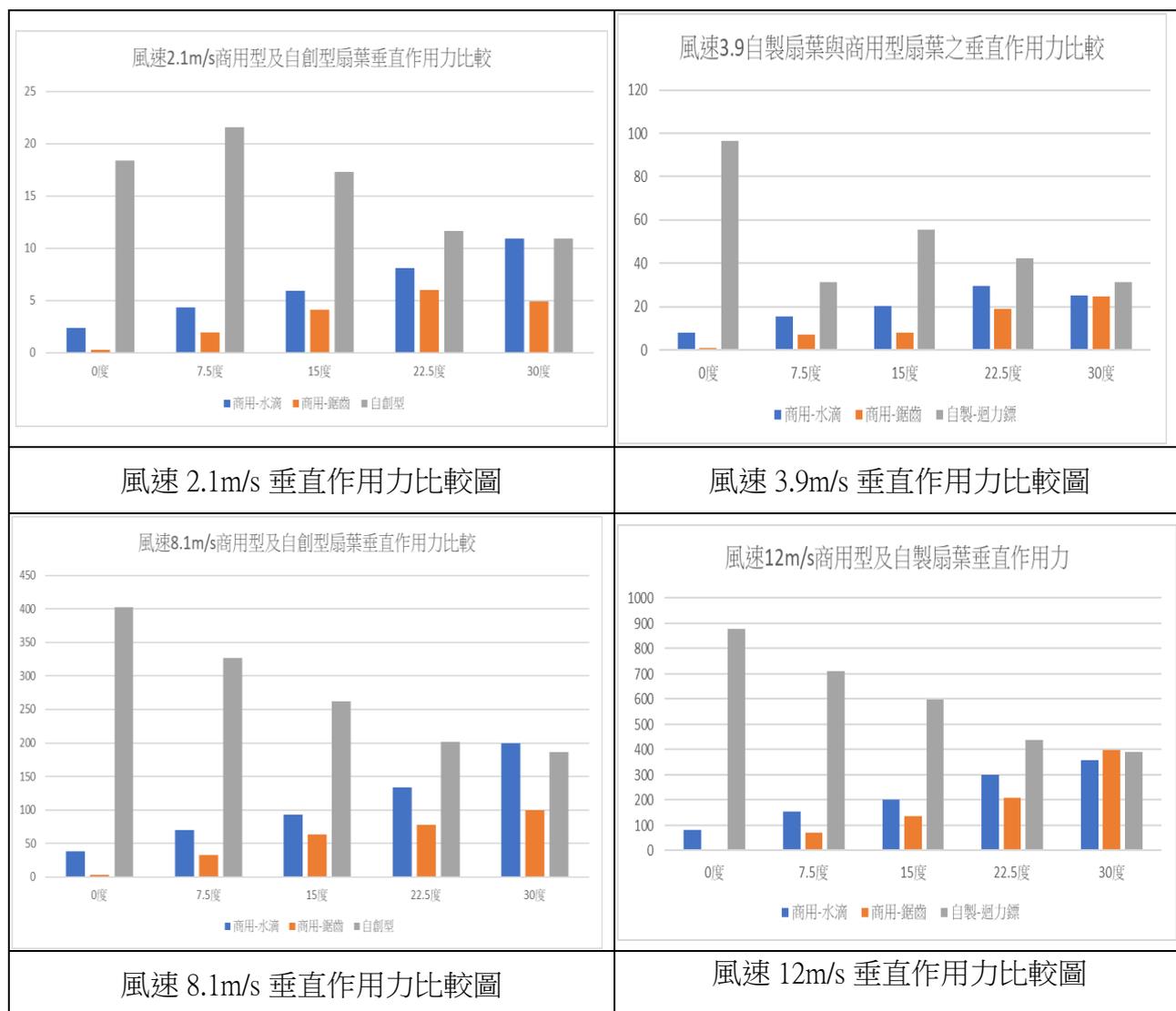
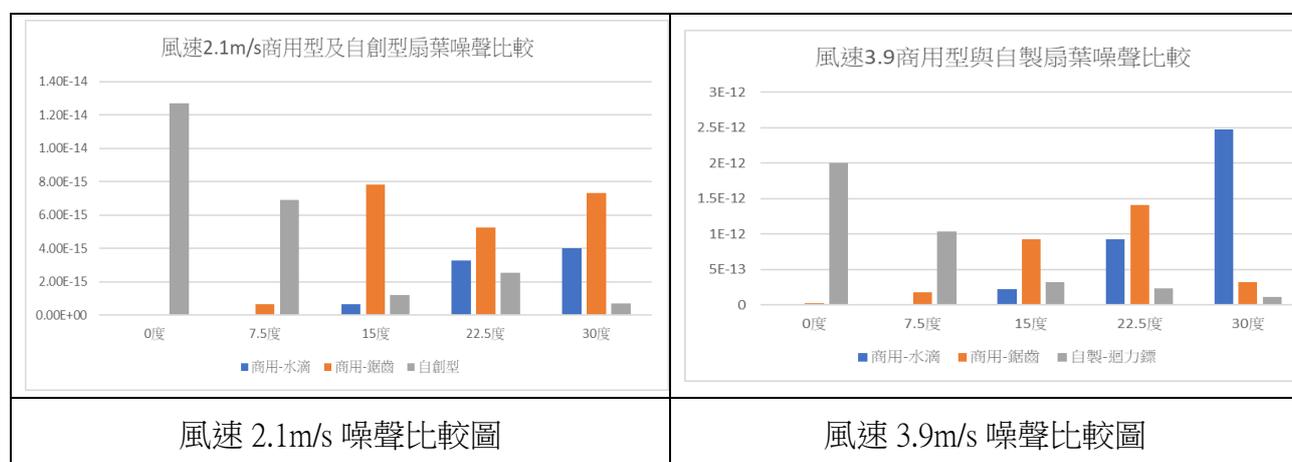
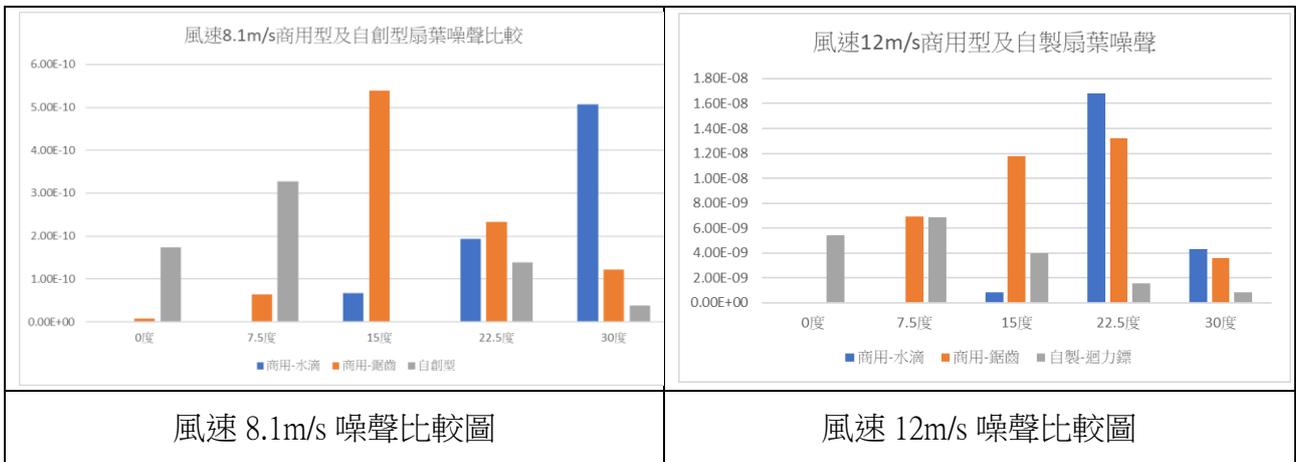


表 13(b)模擬噪聲比較





從以上圖表能夠看出，自創扇葉的垂直作用力都高於商用型扇葉，並且在高於 15 度以上的攻角時，自創扇葉所產生的噪聲都低於商用型扇葉，這代表者我們的自製扇葉無論在垂直作用力或這噪聲的部分，都優於現在市面上所見的商用型，並且我們發現我們的自製扇葉在風速 8.1m/s 至 2.1m/s 區間，採用攻角 15 度為佳的選擇，風速 12m/s 以上則採用攻角 30 度，這兩種情況下可以使自創扇葉有高垂直作用力及最佳的降噪效果。

## 陸、討論

### 一、紊流產出之觀測

(一). 紊流參數之計算:以白努力方程式計算流體在風洞內的流速。

$$\frac{DV}{Dt} = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 V + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla(\nabla \cdot v) \Rightarrow \frac{DV}{Dt} = f - \frac{1}{\rho} \nabla p \Rightarrow W \frac{dw}{dz} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} \Rightarrow$$

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = constant$$

由於進出口處皆與外在連接，兩者壓差 $\Delta p$  應為 0，20 度 C 之空氣密度 $\rho$ 查表得知為  $1.20\text{kg/m}^3$ ， $g$  為重力加速度 $=9.8\text{m/s}^2$ ， $\Delta h$  為進口出口之高度差  $0.025\text{m}$ ，進口流速  $V$  為實驗風速  $3.9\text{m/s}$ ，則可得風洞內流速  $V' = 3.83\text{m/s}$ 。

(二). 再代入雷諾數公式檢驗。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \Rightarrow u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = \frac{P_0}{\rho V^2} \frac{\partial P^*}{\partial x^*} \left[ \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right]$$

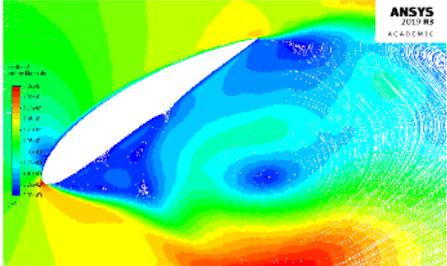
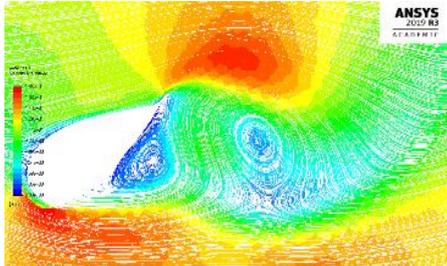
$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

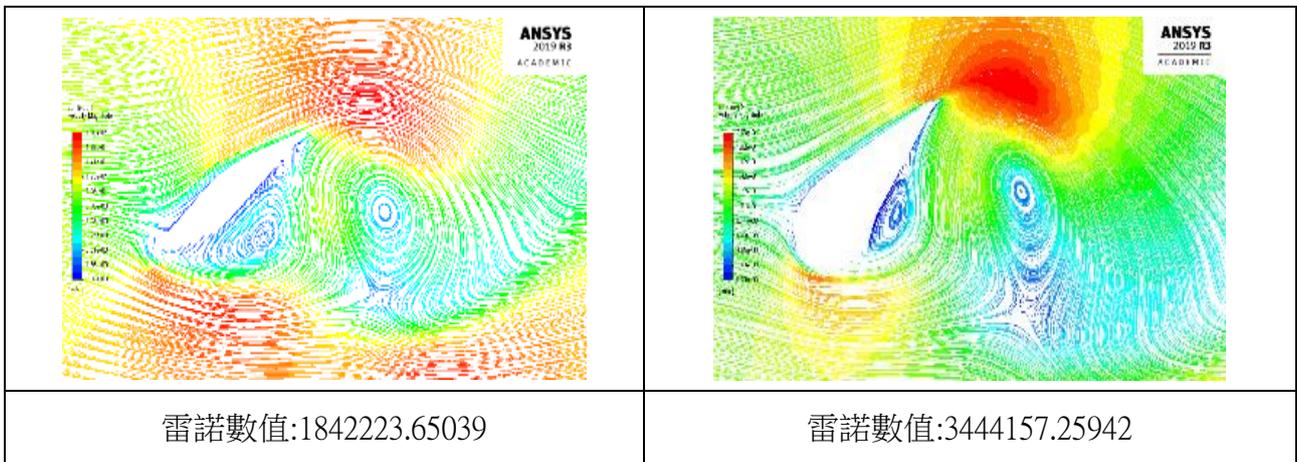
一、空氣密度 $\rho=1.20\text{kg/m}^3$ 、流速  $v=3.83\text{m/s}$ 、查表得知 20 度 C 之空氣黏置係數 $\mu =0.152 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 、以及各種扇葉特徵長度，我們計算出來的雷諾數都在  $10^6$  以上，大於本實驗僅考慮黏滯力之預設開放流場臨界雷諾數  $Re .c =10^5$ ，理應可觀測到紊流情形。

二、模擬圖與實際流場比對

實作模擬之比對:發現除了 NACA4415 外，我們實際拍攝到的紊流圖與模擬程式跑出來之分析圖相當類似，渦漩產生之位置也雷同，至於 NACA4415 為何兩者不同，我們推測的原因為菱形及 NACA4415 扇葉的後方流場太過混亂，並且紊流動能強大，導致其尾流流方向較不一致。

表 14(a)實際照片與模擬之比較

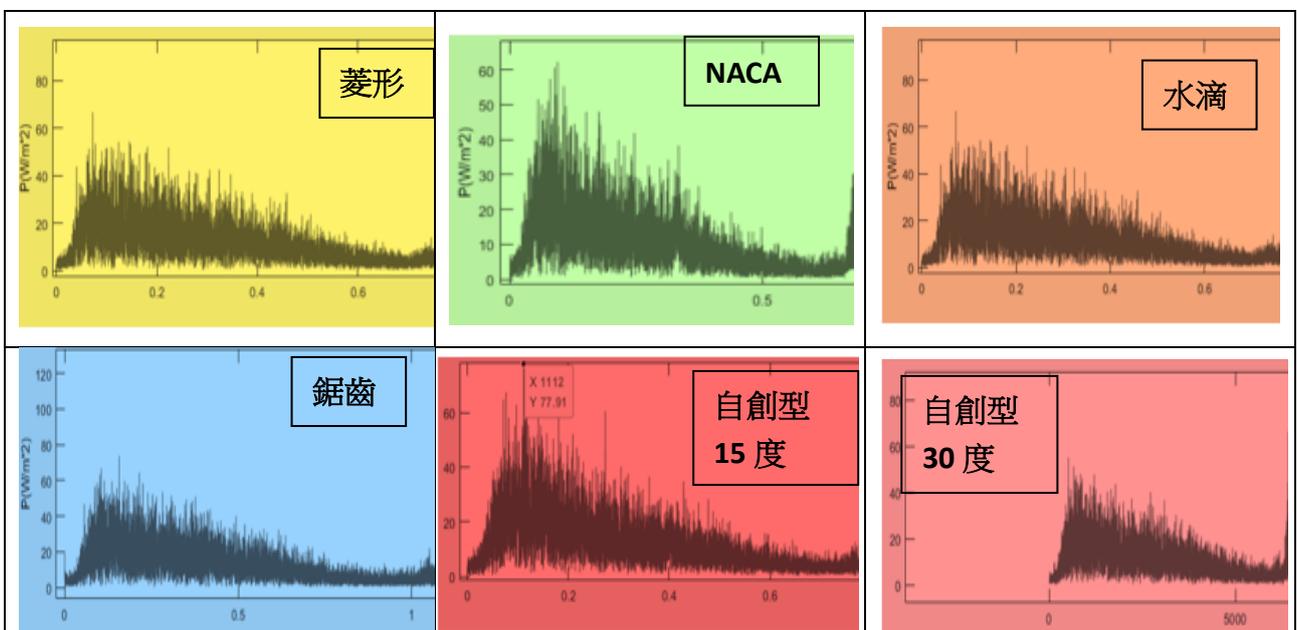
	
<p>NACA 水煙照片</p>	<p>水滴型水煙照片</p>
	
<p>雷諾數值:2135911.47871</p>	<p>雷諾數值: 4004834.02258</p>
	
<p>菱形水煙照片</p>	<p>鋸齒型水煙照片</p>



### 三、風機扇葉之 FFT 圖比較

我們以傅立葉轉換圖形(FFT)比較不同扇葉之音頻最強區域，發現各扇葉都有兩個峰值，一個出現在較高頻區，一個出現在較低頻區，因之前文獻討論的沿岸風機主要是低頻噪音，我們猜測可能扇葉等比例放大後，僅留下了低頻噪聲的區段。比較之後發現，在低頻時音頻強度最強攻角為 22.5 度，而非 30 度，攻角 30 度時強度反而飄移至超高頻區(約 17000Hz)。而自創扇葉表現最為特殊，的最大強度約在音頻 500~1500，且雖然在攻角 15 度時低頻的最大強度與其他扇葉差不多，都落在  $60\text{W/m}^2$  左右，但在高攻角 30 度時，強度都下降到**只有  $50\text{W/m}^2$  以下**，確實達到減噪效果，能在發電效益較好的高攻角達到低噪聲的效果，如表 15 所示。

表 15:比較各種扇葉之攻角 15 度之 FFT 圖比較表



(一). 菱型扇葉分析

葉片中段兩個稜角會導致扇葉在降噪能力上顯弱，導致邊界層提早分離產生更大的紊流，可從

$$u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right)$$

$$u \frac{\partial U}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial X} = U \frac{dU}{dX} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \times u \Rightarrow \frac{\partial u^2}{\partial X} + \frac{\partial(uv)}{\partial X} = U \frac{dU}{dX} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

$$\Rightarrow U \frac{dU}{dX} \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy + \frac{d}{dX} \left[ U^2 \int_0^\delta \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \right] = \frac{\tau_w}{\rho}$$

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \text{ 與 } \theta = \int_0^\delta \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy$$

中得知一旦攻角升高時邊界層主流被抬高導致主流與壁面流體的距離被拉大，增強了邊界層內部的壓差力和動量虧損導致分離點的紊流動能更強，連帶產生極高的噪聲，（圖 5-3-1 菱形流線圖）可看到菱形在高攻角下顯出前後氣壓差、流速差皆非常大，在下方時因為產生加速流場，而翼片又並非流線型，無法有效利用邊界層穩定附近流場，並且翼片正後方會因為強大的逆壓梯度

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \tau_w < 0$$

產生回流，並且會與上下兩旁的加速流場互相影響，形成兩個有相當規模的渦旋，形成的紊流強度為五種翼形中最強的。

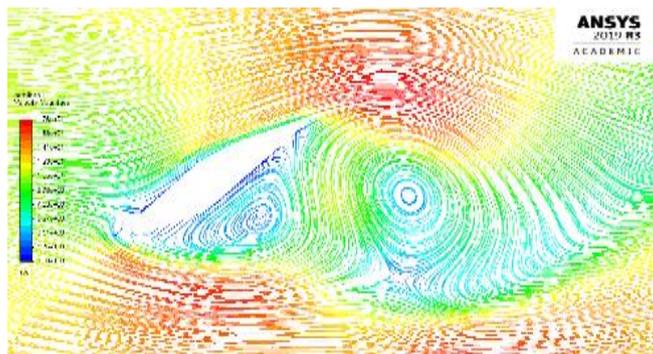


圖 13 菱形流線圖

## (二).NACA4415 扇葉分析

NACA4415 扇葉為商用型飛機翼，並非設計用於風力發電，因此可以從之前研究結果看出，NACA4415 在垂直作用力發面，無論在任何風速、攻角皆有不錯的垂直作用力。我們針對其高攻角情況下進行分析(圖 6-3-2NACA4415 流線圖)，由

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right] & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right] & 0 & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right] \\ -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] & -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right] & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] & 0 & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right] \\ \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right] & 0 \end{bmatrix}$$

微團矩陣可知 NACA 翼片的後半段正下方會產生向上的氣流，此氣流為使得氣流在翼尾形成一個小渦流，此渦流會與翼片下方的加速流場相互影響並且產生一股相當混亂的紊流，倒置 NACA4415 翼片產生的紊流強度十分高，並且噪聲產生量僅次於菱形扇葉。

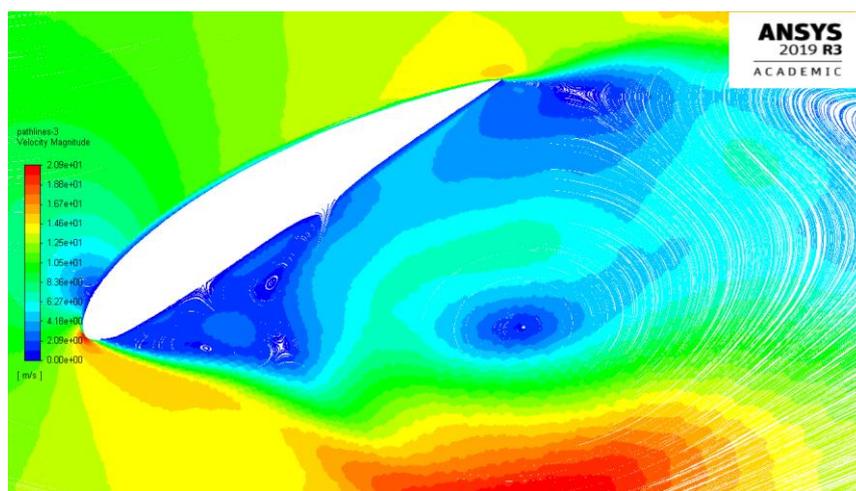


圖 14 NACA4415 流線圖

## 四、根據實作及模擬成果，自創扇葉分析及討論

自創型扇葉分析: 從模擬圖中發現，自創行型前端如菱形扇葉般的尖端設計，使自創扇葉前端的風壓變化較小，此設計有助於自創扇葉解決前後壓強差過大的問題，由位移厚度

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy$$

和動量厚度

$$\theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy + \frac{2\theta + \delta^*}{U} \frac{dU}{dx} + \frac{d\theta}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho U^2} \Rightarrow \frac{d\theta}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho U^2} \int_0^x \tau_w b dx = \rho b \theta U \cdot U$$

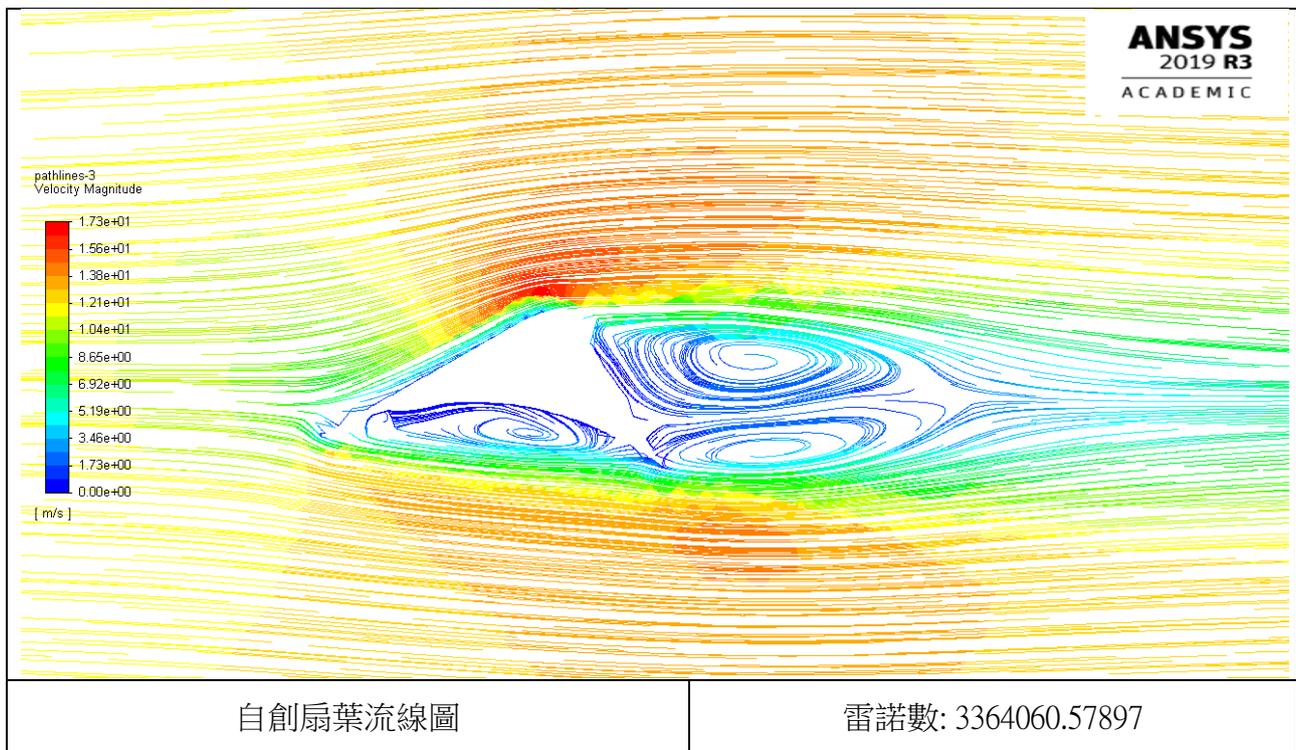
得知能有效避免過強的加速流場產生的，並且因為自製扇葉有類似商用-鋸齒型的平面設計，使適度的加速流場可有效減緩扇葉上方的邊界層受逆壓梯度的影響

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho U^2} \Rightarrow \int_0^x \tau_w b dx = \rho b \theta U \cdot U \Rightarrow \sum F = (mv)_{out} - (mv)_{in}$$

讓上方的邊界層相對穩定，不會使其邊界層過早產生分離，紊流來源只有來自於葉片上下方的加速氣流與翼片後方受到壓力梯度產生的三個渦旋，但這三個渦流動能相對其他扇葉之紊流更弱並且方向更為一致，很快就會受黏滯力變回穩定流場，進而成功的減少噪聲產生，在垂直作用力方面，憑藉著扇葉後方有產生如 NACA4415 般的下沉氣流，使自製扇葉的垂直作用力也能明顯優於商用型扇葉。

表 16 模擬自創扇葉

<p>自創扇葉風速</p>	<p>自創扇葉紊流</p>
<p>自創扇葉風壓</p>	<p>自創扇葉噪聲</p>



## 柒、結論

本研究嘗試以實測及模擬相輔方式，在流體力學物理蘊涵之下，分析影響風機噪聲之相關因子，根據研究方式與結果，略列以下三點推論：

- 一、在實測實驗中，計算出雷諾數值大於臨界，符合紊流條件，透過水煙圖及流線軌跡追蹤，也確實觀測到紊流的渦流現象。在 FFT 圖轉換結果，可以看到噪聲強度最大處皆落於低頻，與文獻提及之低頻噪生符合。而扇葉力矩，表現在垂直作用力上之結果，誤差較大，但其趨勢與模擬之結果相似。
- 二、在模擬實驗中，發現垂直作用力與噪聲呈正相關，且在風速增加時，所有扇葉之噪聲及垂直作用力皆會上升。而攻角對扇葉的影響，取決於各種扇葉之形狀，並無一定規律。大部分葉型在攻角上升時，紊流與噪聲強度大致都呈現上升之趨勢，在中高風速如 8.1m/s 及 12m/s 時尤為明顯，但商用鋸齒型在攻角上升時，紊流與噪聲強度卻是下降的。
- 三、綜合比較分析前四種扇型後，我們研發製成自創型扇葉，從其 FFT 圖可觀之，平均噪聲強度皆低於其他四種，在  $60\text{W/m}^2$  以下，且在高攻角 30 度時，強度更低皆落在  $50\text{W/m}^2$  以下，高攻角通常代表有更好的垂直最用力及發電量可以應用。而模擬結

果顯示，**自創扇葉的垂直作用力高於商用型扇葉**，並且在高於 15 度以上的攻角時，**自創扇葉所產生的噪聲都低於商用型扇葉**，並且測是出自製扇葉在風速 8.1m/s 至 2.1m/s 區間，採用攻角 15 度為較佳的選擇，風速 12m/s 以上則採用攻角 30 度，**這兩種情況下可以使自創扇葉有高垂直作用力及最佳的減噪效果。**

本研究可以繼續鑽研深究的地方亦所在良多，例如各別扇葉的獨立分析、建模精確性的更進一步模擬分析、流體力學及氣動聲學的深入探討等，諸多未知都讓我們感到好奇，希望有待日後更精進所學及研究能力後，繼續研擬發展，對台灣未來的能源發展能有更多助益。

## 捌、參考資料及其他

- 1.馮玉明. (2014). 小型垂直軸風力機氣動力噪音研究. 行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告
- 2.Giguere, P., & Selig, M. (1999). *Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor*. Retrieved from
- 3.Son, E., Kim, H., Kim, H., Choi, W., & Lee, S. J. C. A. P. (2010). Integrated numerical method for the prediction of wind turbine noise and the long range propagation. *10*(2), S316-S319.
- 4.Rogers, A. L., & Manwell, J. F. J. R. E. R. L., University of Massachusetts, Website <http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/WindTurbineNoiseIssues.pdf>. (2004). Wind turbine noise issues.
- 5.Salt, A. N., & Hullar, T. E. J. H. r. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *268*(1-2), 12-21.
- 6.Afanasieva, N. J. A. o. A. (2017). The Effect of Angle of Attack and Flow Conditions on Turbulent Boundary Layer Noise of Small Wind Turbines. *42*(1), 83-91.
- 7.Yu, H., Ahmed, N. A., & Flynn, T. (2014). *Manufacture and material considerations in wind tunnel experimentation*. Paper presented at the Applied Mechanics and Materials
- 8.ArkLab 飛行學院(2017). Arduino 風洞機-自製空氣動力學實驗裝置。Blogger。出刊時間: 2017 年 4 月 7 日。查詢網址:<http://ark-lab.blogspot.com/2017/04/blog-post.html?m=1>.

## 【評語】 051809

本實驗作品探討風車葉片產生之噪音之機制，研究題目很有實用性，可對臺灣的風力發電減少噪音問題有所幫助。很有系統的計算及分析實驗結果，不但報告清楚，再加上一些實驗的錄影更加詳盡。設計的新葉片成功的降低了噪音。成果甚佳，如果加上討論葉片的材質與噪音之關聯性，此研究就會更全面性及深入。

# 摘要

台灣綠能發展為能源界顯學且有得天獨厚的風場條件，然風機扇葉產生之低頻噪聲卻對居民造成身心健康的影響。本研究嘗試研究扇葉噪聲之物裡蘊含，以實作及模擬研究風機噪聲，實作以自製兩款風洞及四組扇葉確實觀測到紊流且與模擬相似，並透過傅立葉轉換得出低頻噪聲強度頗高。而模擬顯示噪聲與紊流高度相關，攻角上升下會有愈大的紊流強度及噪聲，但鋸齒型卻有攻角上升，紊流與噪聲下降之情形。根據實驗結果改良設計出自創扇葉，其垂直作用力優於前四款，且產出較低的噪聲強度，尤其在高攻角條件之下減噪效果更佳。

## 壹、研究動機

風力發電為我國能源政策之重要發展，但台灣沿岸風機的設置除了造價高昂與產電量低以外，其風機運轉時會產生的低頻噪聲會對周遭居民產生心血管疾病或心理疾病的影響。根據學者 Rogers 等人的研究，風力發電機噪聲的來源主要可分為機械噪聲與氣動噪聲[4](Rogers et al, 2004)，而噪聲中的低頻噪聲會對人體產生較大傷害[1](馮玉明, 2014)。以往科展均較重視於風力發電機的發電量以及電功率等研究，較少強調減少噪聲或紊流研究，因此若能從流體力學的層面去探討葉形結構，將對於目前台灣風力發電永續經營有所幫助。

## 貳、研究目的

- 一、設計截面風洞實驗，探討不同扇葉截面之紊流並分析其軌跡。
- 二、探討不同扇葉之實際噪聲，進行傅立葉轉換 FFT 圖分析。
- 三、自製風機並測得參數，對比模擬之結果，分析其依存關係。
- 四、模擬實際風機在不同扇葉及攻角下的垂直作用力、紊流和噪聲。
- 五、分析現今沿岸風機扇葉在流體力學及噪聲之優缺點，改良並設計創造出新型扇葉。

## 參、實驗器材及方法

### 一、紊流及流場風洞、高速攝影機及葉片設計圖

- (一)流場風洞：配置有(1)進流壓縮段、(2)進流收斂段、(3)實驗區、(4)柵欄

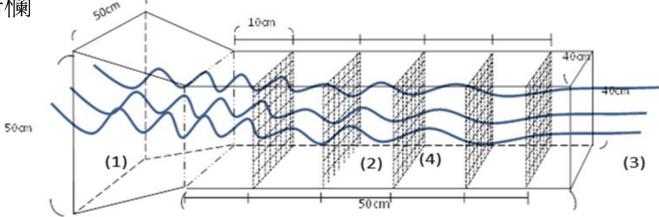


圖 1(a)流場風洞

- (二)紊流風洞：配置有(1)實驗段、(2)進流收斂段、(3)進流壓縮段、(4)進流穩定段

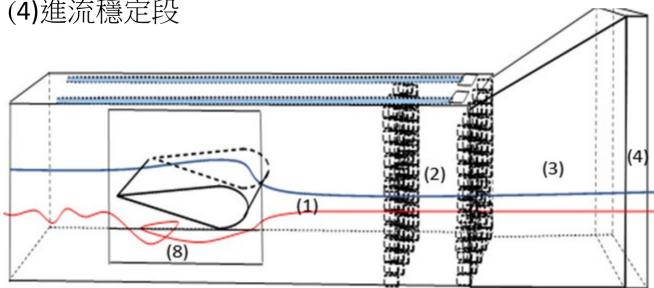


圖 1(b)紊流風洞



圖 2 研究器材

## 流體力學理論與方程式

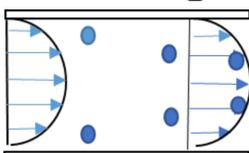
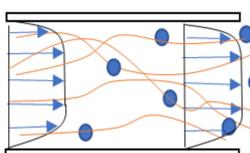
1. 連續方程式：
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$
2. 動量方程式：
$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \nabla \cdot \mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot [(\mu^L + \mu^T) \nabla \mathbf{u}]$$
3. 雷諾數：
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$
4. 白努力方程式：
$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = constant$$
5. 層流與紊流理論：  



圖 3(a)層流示意圖

圖 3(b)紊流示意圖

## 肆、研究架構及流程

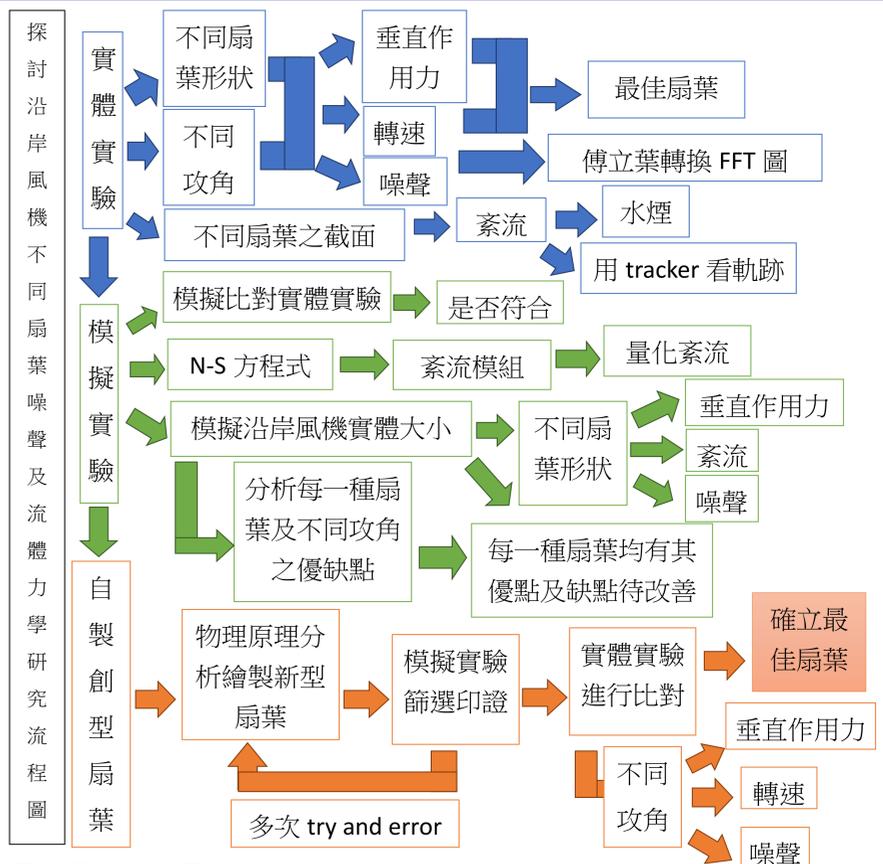


圖 4 研究流程圖

## 伍、研究結果

### 一、探討不同扇葉截面產生之紊流並分析流線軌跡

以白努力方程式與雷諾數之公式計算出之數值=Re= 6278.69

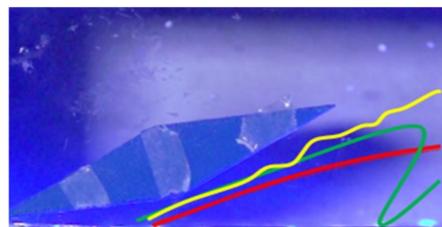


圖 5(a)菱形扇葉紊流軌跡圖 風速 4.11m/s(紅)2.77m/s(黃) 1.98m/s(綠)

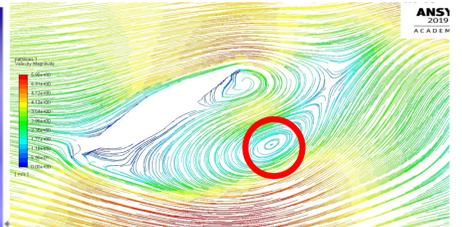


圖 5(b)菱形扇葉流線軌跡圖 紅線 下方渦流影響綠線逆壓梯度回流

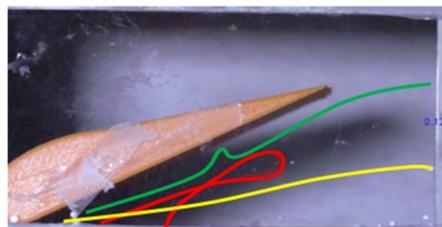


圖 5(c)NACA 扇葉紊流軌跡圖 風速 1.15m/s(紅)4.89m/s(黃)3.00m/s(綠)

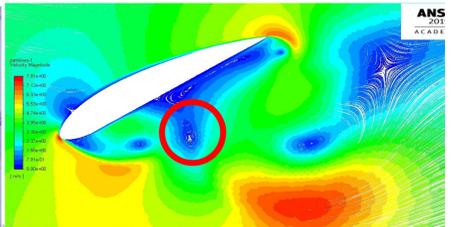


圖 5(d)NACA 扇葉流線軌跡圖 八個 渦流 中間藍色的渦流最為強大

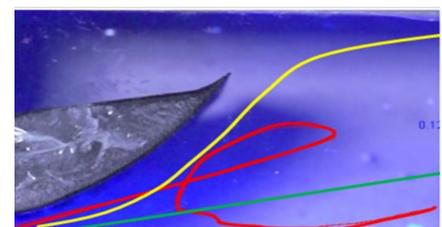


圖 5(e)商用水滴扇葉紊流軌跡圖 風速 2.1m/s(紅)3.6m/s(黃)4.9m/s(綠)

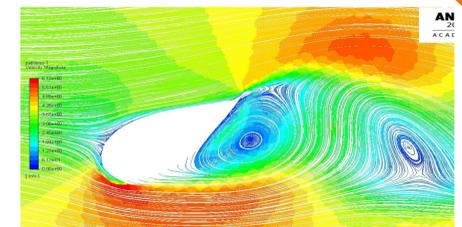


圖 5(f)商用水滴扇葉流線軌跡圖 渦流數量少且強度較低

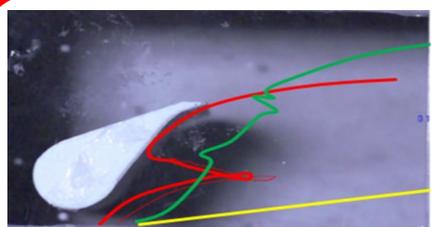


圖 5(g)商用鋸齒扇葉紊流軌跡圖 風速 2.1m/s(紅)3.6m/s(黃) 4.9m/s(綠)

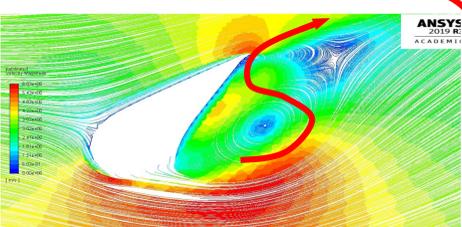


圖 5(h)商用鋸齒扇葉流線軌跡圖 渦流 順時鐘旋轉，與紅線軌跡完全相同

# 五、研究結果

## 二、由自製風機測得參數並對比模擬實驗之結果

### (一) 噪聲檢定

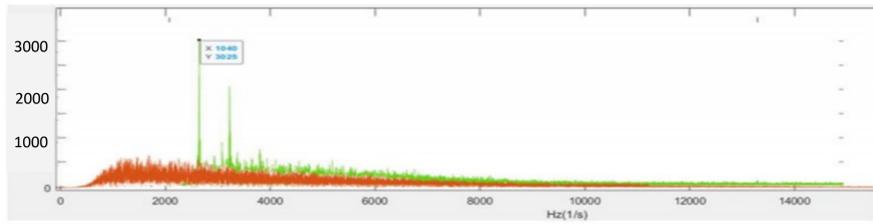


圖 6(a) FFT 噪聲疊圖

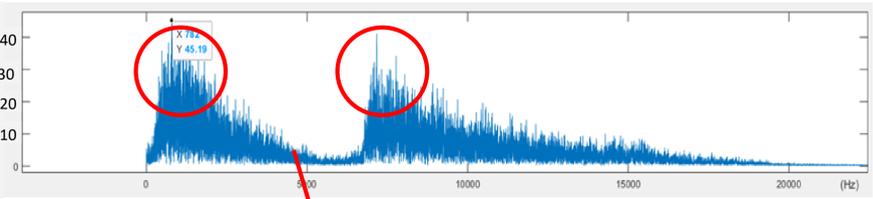


圖 6(b) 自創型攻角 0 度

各扇葉都有一區高頻 一區低頻的噪聲

### (二) 垂直作用力檢定

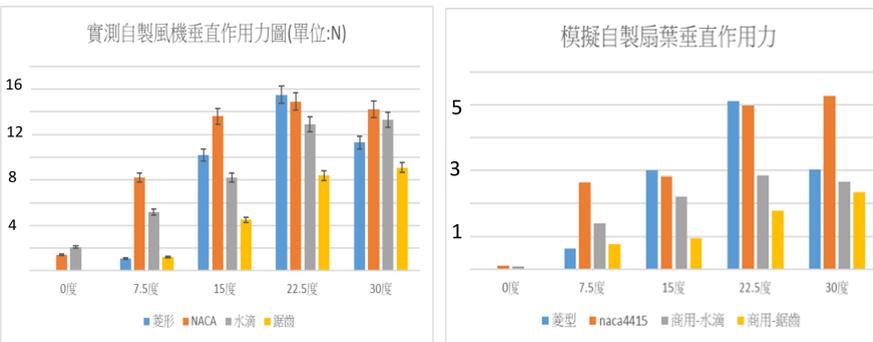


圖 7(a) 實測之扇葉垂直作用力

圖 7(b) 模擬之扇葉垂直作用力圖

## 三、模擬實際風機不同攻角及風速下的紊流噪聲垂直作用力

### (一) 四種扇葉模擬數值比較(風速 12 m/s)

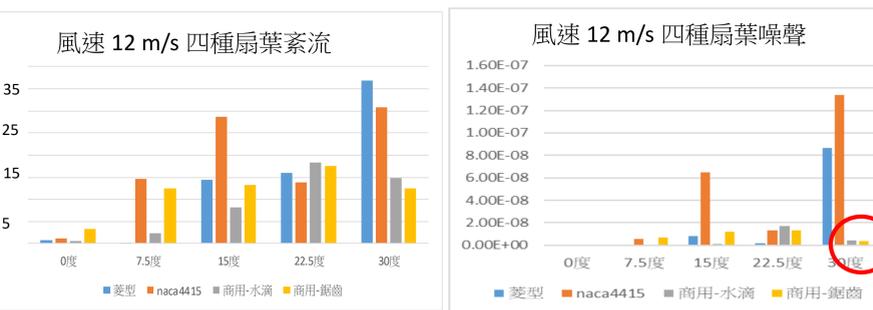


圖 8(a) 模擬風機紊流比較圖

圖 8(b) 模擬風機噪聲比較圖

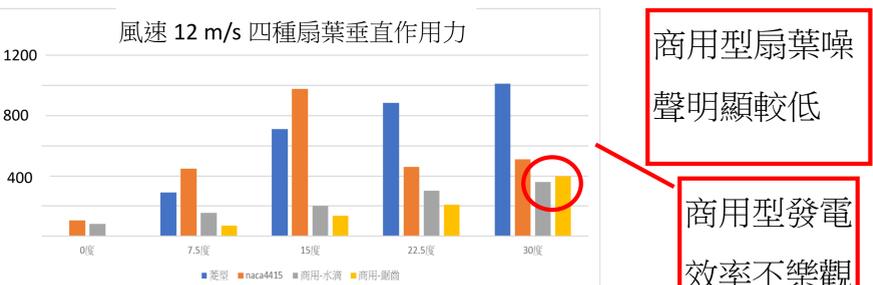


圖 8(c) 模擬風機垂直作用力比較圖

商用型扇葉噪聲明顯較低

商用型發電效率不樂觀

## 四、自創型扇葉之實作及模擬實驗

### (一) 自創型扇葉模擬流線軌跡比較

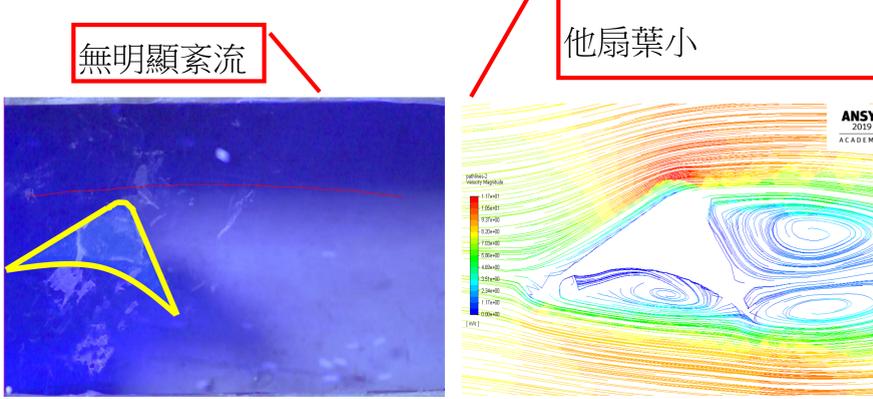


圖 9(a) 自創型實驗軌跡圖 4.69 m/s(紅)

圖 9(b) 自創型扇葉模擬流線軌跡圖

### (二) 實體實驗自創型扇葉與商用型扇葉垂直作用力比較

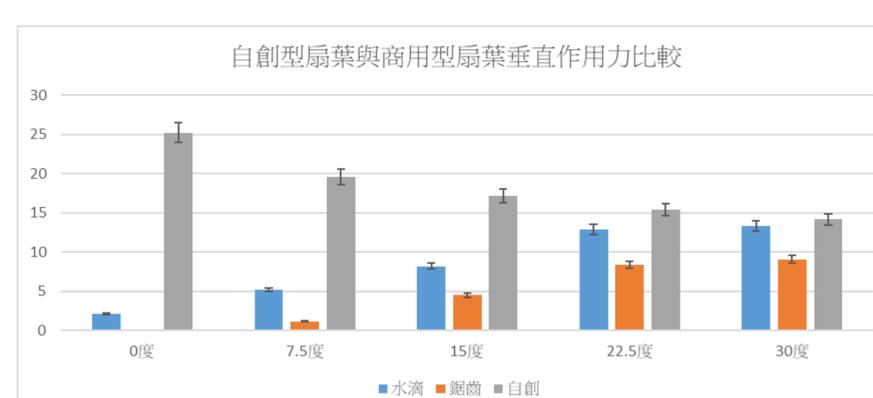


圖 10 自創型扇葉時體實驗垂直作用力比較圖

## (三) 自製型扇葉 FFT 圖 (X 軸單位: Hz, Y 軸單位 W/m<sup>2</sup>)

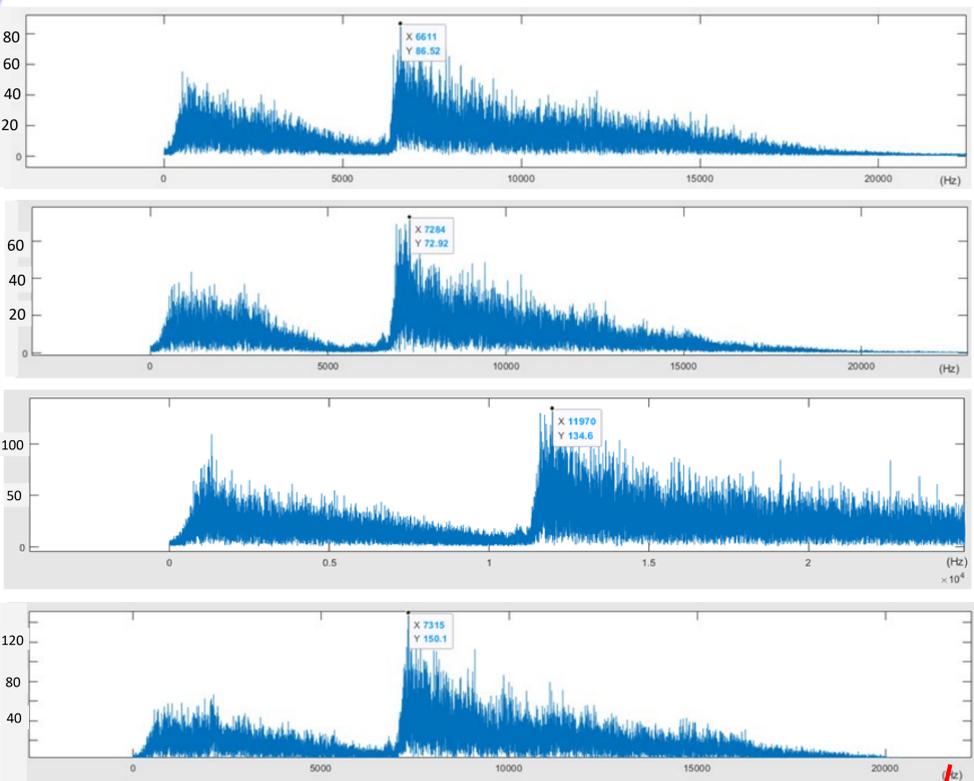


圖 11 實作扇葉 FFT 圖(依序為自創 30 度、自創 15 度、鋸齒 30 度、水滴 30 度)

自創低頻強度低於商用型且在 15、30 度的低頻強度並無上升

## (四) 三種扇葉高風速模擬數值比較(風速 8.1 m/s)



圖 12(a) 模擬自創風機紊流比較圖

發電效率較佳

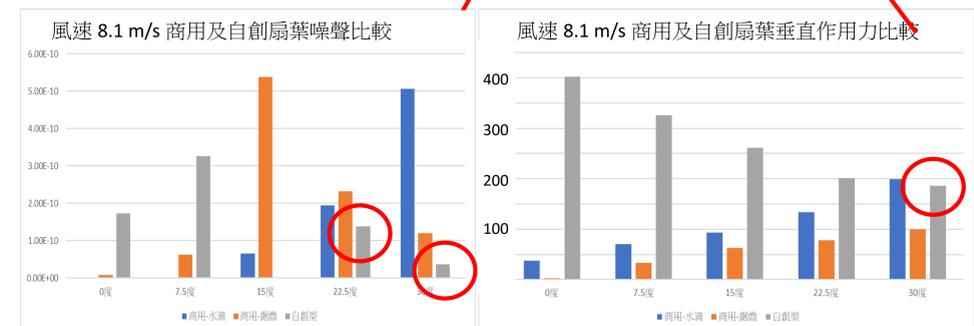


圖 12(b) 模擬自創風機噪聲比較圖

圖 12(c) 模擬自創風機垂直作用比較圖

攻角 15 度以上噪聲均低於商用型

## (五) 三種扇葉低風速模擬數值比較(風速 2.1 m/s)

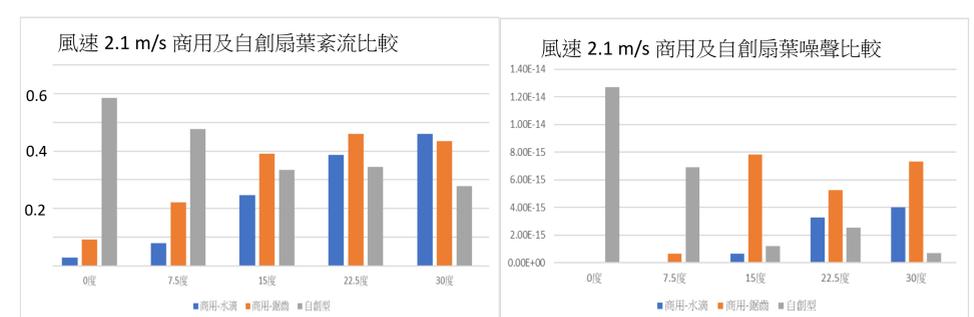


圖 13(a) 模擬自創風機紊流比較圖

圖 13(b) 模擬自創風機紊流比較圖

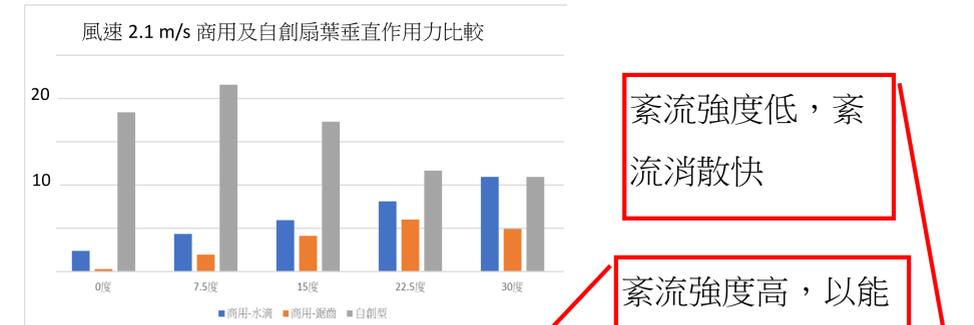


圖 13(c) 模擬自創風機垂直作用力比較圖

紊流強度低，紊流消散快

紊流強度低，以能量階梯方式消散

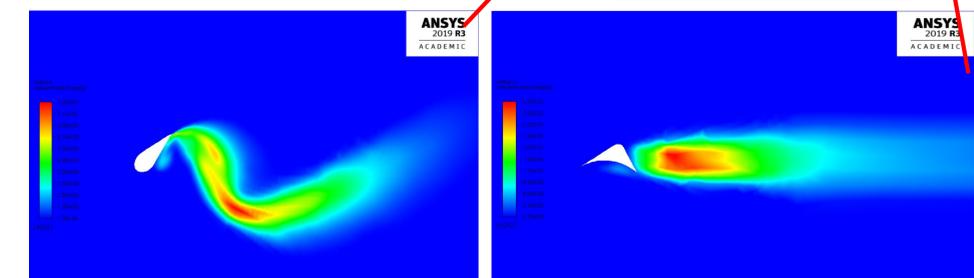


圖 14(a) 攻角度鋸齒型扇葉紊流圖

圖 14(b) 攻角 30 度自創型扇葉紊流圖

# 陸、問題與討論

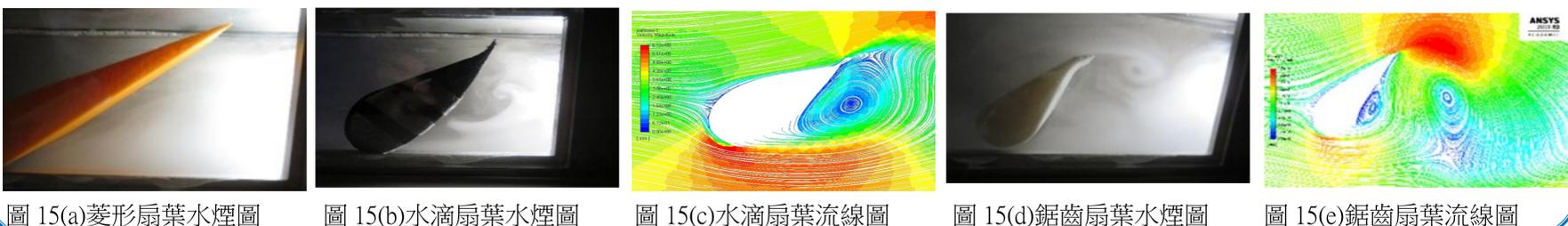
## 一、紊流產出之觀測

進出口處與外連接，壓差為 0，20 度 C 空氣密度查表得知為  $1.20 \text{ kg/m}^3$ ， $\Delta p=0$ 、 $g=9.8\text{m/s}^2$ 、 $v=3.9\text{m/s}$ 、 $\Delta h=0.025\text{m}$ 、 $\rho=1.2\text{kg/m}^3$  為  $9.8 \text{ m/s}^2$ ，進口出口之高度差  $0.025 \text{ m}$ ，流速  $V$  為  $3.9 \text{ m/s}$ ，則可得風洞內流速  $V'$  為  $3.83 \text{ m/s}$ 。

空氣密度為  $1.20 \text{ kg/m}^3$ 、流速  $v=3.83 \text{ m/s}$ 、特徵長度是為  $0.15 \text{ m}$ 、查表得知 20 度 C 空氣黏置係數為  $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，求出雷諾數  $Re=6278.69$ ，大於實驗僅考慮黏滯力之預設開放流場臨界雷諾數  $Re.c=2000$ ，理應可觀測到紊流。

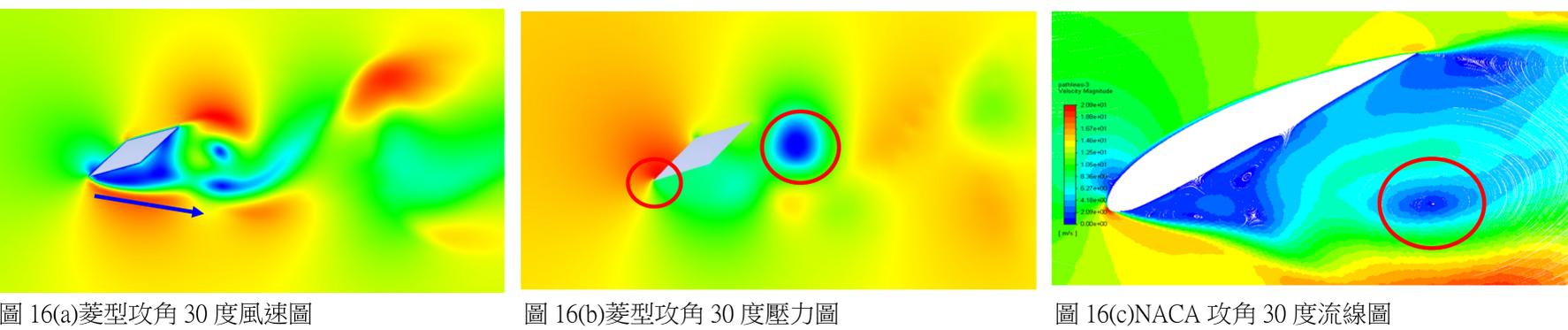
## 二、模擬圖與實際流場比對

實作模擬之比對，發現除了 NACA4415 外，我們實際拍攝到的紊流圖與模擬程式跑出來之分析圖相當類似，渦流產生之位置也雷同，至於 NACA4415 為何兩者不同，我們推測的原因為及 NACA4415 扇葉的後方流場太過混亂，並且紊流動能強大，導致其尾流流方向較不一致。

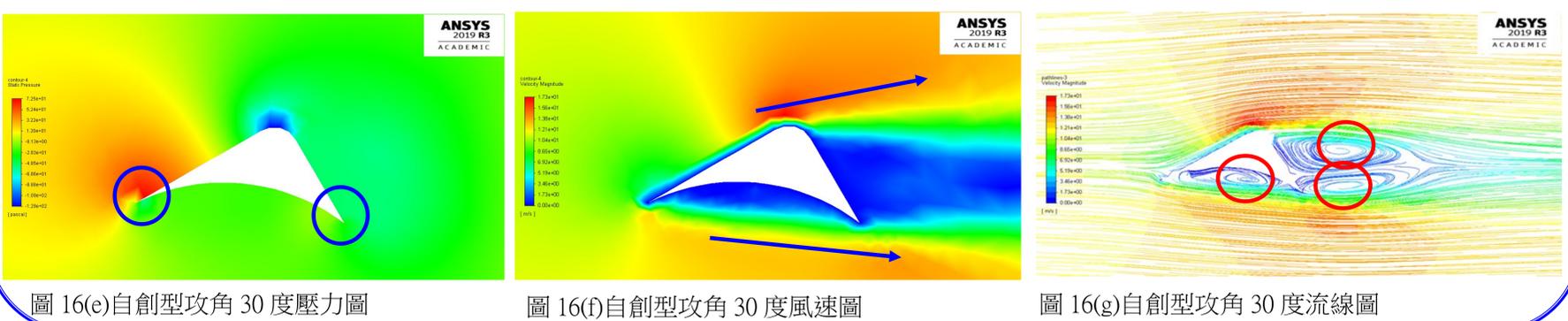
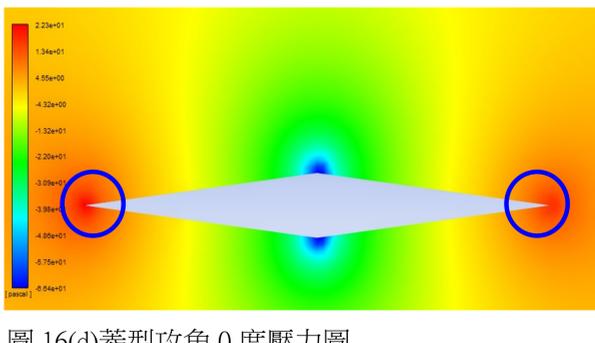


## 四、菱型、NACA4415、自創扇葉之分析

首先是菱形扇葉，攻角 30 度時菱形扇葉因為前後氣壓差大所以在下方產生加速流場以致流速差大，而翼片為非流線型，無法用邊界層穩定流場也因強大的逆壓梯度產生回流。接下來 NACA4415 作為商用型飛機機翼，會在後半下方會產生向上氣流形成一個小渦流，此渦流會與翼片下方的加速流場相互影響，造成紊流強度和噪聲提高。



自創型前端的尖端設計，使扇葉前端的風壓變化較小，此設計有助於解決前後壓差過大的問題，能有效避免過強的加速流場；扇葉後方產生如 NACA4415 的上升氣流，也能提高扇葉的垂直作用力；且有類似鋸齒型的平面設計，讓上方的邊界層相對穩定，不會過早產生分離；紊流來源只有上方與下方的加速氣流和翼片後方受到壓力梯度產生的三個渦旋，但很快就會受黏滯力拉回成穩定流場，減少噪聲產生。



# 柒、結論

一、在實測中  $Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{1.2 \times 3.83 \times 0.15}{1.8 \times 10^{-5}}$  計算出雷諾數值 6278.69 高於層流狀態的 2100 也高於 2100 至 4000 的過度帶，符合紊流邊界層出現的條件。在 FFT 圖轉換結果，可以看到各扇葉低頻噪聲 20 至 200 Hz 的強度約落於 40 至 50 W/m<sup>2</sup>。

二、風速增加邊界層厚度也會上升，因伯努力方程  $p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = constant$  得知邊界層上下壓差大，產生強大逆壓梯度造成邊界層分離，進而導致紊流強度及噪聲上升。大部分葉型在攻角上升時，逆壓梯度變強導致紊流與噪聲強度都上升，但商用鋸齒型攻角上升，不會有過強的逆壓梯度，紊流與噪聲強度則會下降。

三、而根據位移厚度  $\delta^* = \int_0^\delta (1 - \frac{u}{V}) dy$  與動量厚度  $\theta = \int_0^\delta \frac{u}{V} (1 - \frac{u}{V}) dy$  可知當風速上升兩者皆變大，其邊界層內黏滯力也愈大，再由 Navier-Stokes equation 得知其壓差變大增強其逆壓梯度，進而導致紊流強度及噪聲上升。

四、FFT 圖中，自創扇葉平均低頻噪聲強度皆低於其他四種。而在模擬高於 15 度以上的攻角時，自創扇葉所產生的噪聲都低於商用型扇葉；且自創扇葉在風速 8.1 m/s 至 2.1 m/s 區間，採用攻角 15 度為較佳選擇，風速 12 m/s 以上則採用攻角 30 度，

這兩種情況下可以使自創扇葉有高垂直作用力及最佳的減噪效果。

展望未來，我們研究提供了更好的參數條件以及運用。

## 捌、參考資料

1. 馮玉明. (2014). 小型垂直軸風力機氣動力噪音研究. 行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告
2. Son, E., Kim, H., Kim, H., Choi, W., & Lee, S. J. C. A. P. (2010). Integrated numerical method for the prediction of wind turbine noise and the long range propagation. 10(2), S316-S319.
3. Rogers, A. L., & Manwell, J. F. J. R. E. R. L., University of Massachusetts, Website <http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/WindTurbineNoiseIssues.pdf>. (2004). Wind turbine noise issues.
4. Salt, A. N., & Hullar, T. E. J. H. r. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. 268(1-2), 12-21.
5. Afanasieva, N. J. A. o. A. (2017). The Effect of Angle of Attack and Flow Conditions on Turbulent Boundary Layer Noise of Small Wind Turbines. 42(1), 83-91.